

TRAITÉ
DE PHYSIQUE.

Paris. — Typographie de Firmin Didot frères, rue Jacob, 56.

TRAITÉ
DE PHYSIQUE

CONSIDÉRÉE DANS SES RAPPORTS

AVEC LA CHIMIE

ET

LES SCIENCES NATURELLES,

PAR M. BECQUEREL,

DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES DE L'INSTITUT,
PROFESSEUR-ADMINISTRATEUR AU MUSEUM D'HISTOIRE NATURELLE,
MEMBRE DE LA SOCIÉTÉ ROYALE DE LONDRES,
DE L'ACADÉMIE DE BERLIN, DES SOCIÉTÉS D'HISTOIRE NATURELLE DE PARIS,
DE CORNWAL, DE GENÈVE, ETC., ETC.

TOME PREMIER.





PARIS,
LIBRAIRIE DE FIRMIN DIDOT FRÈRES,
RUE JACOB, 56.

—

1842.

AVANT-PROPOS.

Depuis la fin du siècle dernier, la physique et la chimie ont pris un tel essor, qu'elles peuvent aujourd'hui se prêter un mutuel appui et répandre de vives lumières sur la physiologie et les diverses branches des sciences naturelles.

Pendant longtemps ces sciences sont restées isolées, parce qu'il fallait d'abord les développer et les étendre avant de songer à trouver entre elles des rapports, c'est-à-dire, découvrir des faits, les étudier sous toutes leurs faces pour s'assurer de leur exactitude, puis les classer et les analyser, afin d'arriver à la connaissance des causes et des principes, en évitant toutefois de s'élever trop rapidement des faits particuliers aux principes généraux, comme on est trop souvent enclin à le faire.

Cette marche de l'esprit humain, dans l'étude des sciences, suivie instinctivement par Galilée et ses disciples, et formulée si heureusement par Bacon, est devenue une règle de conduite dont on ne saurait s'écarter sans courir la chance de s'égarer; mais si la méthode analytique, qui consiste à diviser pour arriver plus sûrement aux principes, produit de grands résultats, il ne faut pas l'adopter à l'exclusion de la méthode synthétique qui rapproche les parties pour

arriver au même but, quand on embrasse l'ensemble d'une science.

C'est à l'époque actuelle qu'il faut employer cette dernière méthode pour cimenter l'alliance entre les sciences physiques, chimiques et naturelles, qu'on cherche à établir de toutes parts, depuis que les faits débordent les cadres dans lesquels on les tenait renfermés.

Tous les corps qui frappent nos yeux sont composés de particules réunies en vertu de forces dont la nature nous est plus ou moins inconnue, selon qu'ils sont organisés ou non. La formation des premiers est encore enveloppée d'un profond mystère; mais il n'en est pas tout à fait de même de celle des corps inorganiques, attendu qu'un grand nombre de faits tendent à prouver que leurs particules sont soumises à l'action de forces qui paraissent avoir des rapports intimes avec les forces électriques.

Les recherches faites à ce sujet par Davy et Berzelius ont donné une impulsion extraordinaire aux sciences physico-chimiques; les savants de tous les pays se sont empressés et s'empresseront encore de concourir à la découverte des propriétés d'un principe dont la connaissance sera de la plus haute importance pour la philosophie naturelle, puisqu'elle nous aidera à résoudre un jour la plupart des questions relatives aux actions à petite distance, comme Newton l'a fait pour les attractions planétaires.

La force en vertu de laquelle les particules hétérogènes s'unissent ensemble, dans la nature inorganique, est différente ou du moins n'est pas du même ordre que celle qui préside à l'attraction moléculaire. La première, les affini-

tés, est inséparable des forces électriques, elle ne manifeste pas son action sans que celles-ci se montrent et qu'elles aient des intensités égales dans les mêmes circonstances; leur dépendance est telle, que l'une peut servir à reproduire l'autre et réciproquement; aussi ne saurait-on mettre trop de soin à leur étude comparative. La physique, pour étudier les effets de la seconde force, l'attraction moléculaire, emploie le clivage, l'élasticité et la lumière polarisée. Le clivage fait connaître le système cristallin des substances minérales; les phénomènes d'élasticité nous fournissent des données précieuses pour trouver la constitution des corps en général; un faisceau de lumière polarisée en pénétrant, comme une sonde infiniment déliée, dans un corps transparent, nous indique par les modifications qu'il en éprouve, à quel système cristallin appartient ce corps, et nous donne en même temps les moyens d'en déterminer l'arrangement moléculaire.

La polarisation circulaire nous permet, en outre, d'étudier la constitution de composés organiques, depuis qu'on a découvert cette propriété dans un certain nombre de substances solides et liquides, et que l'on a reconnu que plusieurs d'entre elles, dont la composition chimique est semblable, ne la possèdent pas au même degré. Cette différence dans les effets produits en indique nécessairement une dans le groupement des molécules.

Nous pouvons maintenant, à l'aide de la polarisation circulaire, distinguer dans un certain nombre de dissolutions s'il y a seulement mélange ou combinaison chimique, suivre dans les organes des végétaux la conversion de la

gomme en matière sucrée, et assister, pour ainsi dire, aux élaborations de la séve.

Si l'on joint à ces moyens d'investigation l'emploi du microscope pour découvrir l'organisation de la fécule, du gluten, du pollen, et des divers tissus des plantes, on aura une idée des services que la physique peut rendre à la chimie organique.

Les forces constitutives des corps, quelle que soit leur nature, ont des rapports tellement immédiats avec la chaleur, que leurs effets réciproques doivent être étudiés simultanément.

De quelque côté que l'on porte les regards, on ne voit que des phénomènes qui dépendent d'autres phénomènes, tant est grande la relation qui existe entre toutes les forces de la nature. La phosphorescence en est une preuve manifeste; c'est cette propriété bien digne de fixer l'attention du physicien, du chimiste et du physiologiste, que possèdent la plupart des corps, de devenir lumineux dans l'obscurité, et quelquefois même au jour, par la chaleur, la lumière, le frottement, le choc, la compression, les décharges électriques, les actions chimiques vives ou lentes, et les forces vitales soumises à l'action de la volonté chez les animaux qui sont doués de cette faculté.

Le philosophe doit faire aussi une étude spéciale des actions lentes qui ont continuellement lieu à la surface et dans l'intérieur de la terre, et à la production desquelles concourent toutes les forces de la nature, la chaleur, la lumière, l'électricité, les affinités, la capillarité, et même les forces organiques. Jadis on s'en occupait peu, parce qu'on ne

connaissait pas toutes les causes qui concourent à leur développement; en voyant, par exemple, des médailles antiques de bronze, transformées en protoxyde de cuivre, sans que leur forme ait éprouvé d'autres changements qu'une augmentation de volume, on se bornait à dire que cette espèce de métamorphose était le résultat d'une cémentation; aujourd'hui on fait plus, on reproduit des effets analogues, et l'on démontre en même temps que la nature a dû employer des forces semblables à celles dont on fait usage. Telle est la puissance de ces forces qu'en agissant lentement, elles permettent de former un grand nombre de produits naturels, et de suivre, dans les organes et les tissus des animaux et des végétaux, la formation des composés inorganiques, qui s'y déposent quelquefois, comme nous en avons un exemple dans les œufs du limaçon des jardins, dont l'enveloppe extérieure se recouvre intérieurement de cristaux de spath calcaire, aussi nets et aussi transparents que les rhomboèdres de spath d'Islande, qui font l'ornement de nos collections minéralogiques.

Ne pourrait-on pas, à l'aide des actions lentes, avoir une idée des époques auxquelles ont eu lieu quelques-unes des grandes catastrophes qui ont bouleversé, à diverses reprises, la surface du globe? On sait que certaines roches, entre autres différents granites, se décomposent journellement; l'action ayant lieu de la surface du sol à l'intérieur, il n'est pas permis de douter qu'elle ne soit due aux influences atmosphériques; or, comme on en suit facilement les progrès dans les terrains coupés à pic et dans les blocs détachés, ne serait-il pas possible d'établir une relation entre ce

qui s'est passé dans un nombre déterminé de siècles, et les effets produits depuis le commencement de la décomposition, de manière à obtenir une valeur approchée du nombre de siècles écoulés depuis le dernier cataclysme.

L'étude des actions lentes a une portée dont on ne connaît pas encore toute l'étendue, tant sous le rapport scientifique que sous le rapport industriel. L'application qu'on est à la veille d'en faire à l'extraction de quelques métaux, de leurs minerais respectifs, particulièrement de l'argent, en sera une preuve.

Quant aux forces qui régissent la nature organique, elles ont un mode d'action qui leur est propre; mais elles ne sont pas tellement indépendantes de celles qui président à la formation des composés inorganiques, que les dernières ne puissent exercer sur elles une certaine influence. C'est en recueillant et analysant avec soin tous les effets qui résultent du concours de ces deux espèces bien distinctes de forces, que l'on parviendra à jeter quelque lumière sur les phénomènes de la vie.

TRAITÉ DE PHYSIQUE

DANS SES RAPPORTS

AVEC LA CHIMIE

ET

LES SCIENCES NATURELLES.

INTRODUCTION HISTORIQUE.

CHAPITRE PREMIER.

Considérations générales sur la direction à suivre dans l'étude de la physique appliquée.

L'application de la physique à la chimie et aux sciences naturelles a été l'objet de mes études favorites depuis vingt années. Le Traité que je présente aujourd'hui au public renferme les expériences, observations et réflexions que j'ai été à même de faire dans l'étude de la physique envisagée sous ce point de vue. Mais avant d'entrer en matière, je crois devoir présenter des considérations générales qui pourront avoir quelque utilité, ainsi qu'un résumé historique de la marche que cette science a suivie depuis les temps les plus reculés jusqu'à nos jours, particulièrement dans ses rapports avec les progrès des sciences en général et de la civilisation en particulier.

L'administration du Muséum d'histoire naturelle, en sollicitant du gouvernement la création d'une chaire de physique appliquée à l'étude des sciences naturelles, a eu pour but de combler une lacune qui existait dans son système d'enseignement depuis sa réorganisation, en 1793. A cette époque, la physique était peu cultivée en France, et surtout d'une manière moins philosophique qu'elle ne l'avait été quelques années auparavant par Lavoisier, Laplace et Coulomb. D'un autre côté, les immortelles découvertes de Volta, qui devaient imprimer une si grande impulsion aux sciences physico-chimiques, et

établir des rapports si intimes avec une foule de phénomènes naturels, n'avaient pas encore paru.

La chimie, au contraire, venait d'éprouver une grande révolution qui la plaçait presque au rang des sciences exactes, et attirait sur elle les regards de quiconque aimait à se rendre compte des phénomènes naturels; son étude était même un besoin dans ces temps de tourmente où tout était à créer pour résister à l'étranger qui envahissait nos frontières; c'était assez pour la rendre populaire; tandis que la physique, dont les applications n'étaient pas aussi immédiates, et qui ne pouvait répondre par conséquent aux exigences du moment, ne fut pas comprise dans le système d'enseignement adopté par le Muséum. Aujourd'hui, les temps sont bien changés, et cette science a repris le rang qu'elle a toujours occupé dans la philosophie naturelle. La chimie, sans aucun doute, est indispensable dans l'étude des sciences naturelles, et en particulier de celles qui sont relatives à la physiologie; car cette foule d'élaborations qui ont lieu dans l'intérieur des corps organisés ne sauraient être produites sans le concours des affinités; mais les affinités ne sont pas les seules forces qui interviennent, les forces physiques y jouent encore un certain rôle. Il existe, par conséquent, une lutte continuelle entre les forces vitales, les forces physiques et les affinités. Il est donc de la plus haute importance de suivre pas à pas cette lutte, afin de pouvoir établir les rapports qui existent entre ces trois forces. Une lutte semblable existe entre les affinités et les forces physiques dans la nature inorganique, comme nous en avons un exemple dans cette multitude de réactions qui ont lieu à la surface et dans l'intérieur du globe. Les recherches relatives aux rapports qui existent entre toutes ces forces, sont du domaine de la physique appliquée à l'histoire naturelle. L'étude de la physique, considérée sous ce point de vue, ne saurait être séparée de celle de la chimie; aussi les rapports qui lient ces deux sciences prennent-ils de jour en jour de plus grands développements.

La chimie est donc inséparable aujourd'hui de la physique générale, surtout depuis que l'on a trouvé que les affinités et les forces électriques sont deux forces concomitantes qui se manifestent toujours ensemble, qui sont dépendantes l'une de l'autre, et paraissent avoir des intensités égales dans les mêmes circonstances. Les rapports existant entre ces forces sont si bien établis, que l'une peut servir à reproduire l'autre, et *vice versâ*. Si donc on veut étendre le domaine de ces deux sciences, il faut les cultiver simultanément, l'une devant servir à l'avancement de l'autre, et réciproquement.

Avant 1789, et même quelques années après, les cours de physique, en France, étaient très-élémentaires et n'avaient pas acquis l'importance qu'ils ont eue depuis que MM. Biot et Gay-Lussac ont commencé à introduire dans l'enseignement de la physique cette méthode philosophique, cet esprit d'analyse, ces moyens d'investigation précis, délicats, ingénieux, sans lesquels on ne saurait réussir dans l'étude des sciences expérimentales.

Peut-être devons-nous ranger au nombre des causes qui se sont opposées longtemps et s'opposent encore, jusqu'à un certain point, à ce que l'étude de la physique, considérée sous le point de vue philosophique, soit très-populaire, le luxe des instruments qui servent aux démonstrations dans les cours publics. En effet, lorsqu'un jeune homme entre dans un amphithéâtre, et qu'il voit pour la première fois des instruments de physique, dont le fini des ornements le dispute à la précision, il doit se demander si l'on ne peut cultiver la physique avec succès, sans avoir les moyens nécessaires pour faire exécuter de semblables instruments. Cette idée seule, s'il n'a d'autre guide que lui-même, suffira pour le détourner de se livrer à une étude pour laquelle il se sentait un penchant naturel, avant d'avoir vu un cabinet de physique. Mais pour peu qu'il consulte les travaux des philosophes qui ont étudié, analysé, approfondi les phénomènes naturels, depuis Galilée jusqu'à nos jours, il demeurera convaincu que les plus grandes découvertes ont été faites la plupart du temps avec des appareils formés avec les premiers objets qui tombaient sous la main, et qui sont toujours à la disposition de celui qui sait interroger la nature. Entre mille exemples, je citerai les suivants:

Pour évaluer la densité d'un corps, Archimède n'a eu besoin que de peser ce corps, successivement dans l'eau et dans l'air, et de comparer le poids dans l'air au poids dans l'eau.

Galilée, âgé de 18 ans, découvrit l'isochronisme des oscillations du pendule en observant le mouvement périodique et réglé d'une lampe suspendue à la voûte de l'église de Pise, sa patrie.

Toricelli, ayant rempli de mercure un long tube de verre ferm par un bout, et l'ayant renversé dans un bain de ce métal, la colonne de mercure s'abaissa et se fixa à vingt-huit pouces environ au-dessus de son niveau; il en conclut aussitôt que cette colonne faisait équilibre à la pression de l'air, qu'on n'avait fait que soupçonner depuis peu de temps.

Otto de Guericke, de Magdebourg, construisit lui-même une pompe pneumatique grossière, à l'aide de laquelle il parvint à diminuer la quantité d'air renfermée dans un ballon. Cette pompe, perfectionnée

au point d'enlever presque tout l'air, est devenue notre machine pneumatique.

Franklin, pour établir l'identité de la foudre avec l'électricité, lança dans les nuages un cerf-volant.

Volta construisit le plus admirable instrument que possèdent les sciences physiques et chimiques, avec des disques d'argent, de zinc, et des rondelles de drap humide disposés en colonne.

Haüy ayant laissé tomber par hasard un cristal de chaux carbonatée prismatique, fut frappé de la manière dont un angle avait été fracturé. Cette simple observation, dont il suivit toutes les conséquences avec une rare sagacité, et en ne se servant seulement que d'un couteau, d'un marteau et d'un compas grossier, pour mesurer les angles, le mit sur la voie de la forme primitive des cristaux appartenant à la même espèce, et des lois qui régissaient, suivant lui, la superposition des couches de molécules dont sont formés les cristaux secondaires.

Pour déterminer dans les corps les lignes de moindre et de plus grande élasticité, il suffit, comme Chladni le fit le premier, et ensuite M. Savart, avec tant de bonheur, de saupoudrer de sable les surfaces vibrantes et d'examiner les figures acoustiques qui se forment, figures qui sont en rapport avec la constitution moléculaire des corps.

Veut-on appliquer la physique à l'étude des phénomènes naturels, la nature devient le laboratoire, et l'on a pour instruments les objets divers répandus à profusion sur la surface du globe. En simplifiant ainsi les moyens d'investigation, on rend plus facile l'étude de la physique, on économise le temps, et par là on double la vie. Ce n'est pas tout encore; quand on se livre à l'étude de la physique générale, il faut s'habituer de bonne heure à se servir du marteau, du ciseau, de la scie, de la lime et du rabot; il faut être initié jusqu'à un certain point dans les arts manuels et posséder des notions des sciences qui ont des rapports plus ou moins directs avec la physique. Nous citerons pour exemple Galilée, qui s'était habitué dès ses plus jeunes années, par un sentiment instinctif, aux ouvrages manuels; encore dans l'enfance, il imitait avec une précision remarquable toutes les machines qu'on lui présentait, et il ne cessait ses travaux que lorsqu'il était parvenu au but qu'il s'était proposé.

Newton avait également une aptitude singulière pour les inventions mécaniques, et imitait, dans son enfance, toutes les machines qu'il voyait. Je pourrais citer encore d'autres philosophes, et en particulier Franklin, qui étaient habiles dans les travaux manuels.

Quand on veut réussir dans les recherches scientifiques, il faut que la même pensée vous préoccupe nuit et jour, et se change, pour ainsi dire, en une espèce de monomanie qui ne vous laisse aucun repos. En attaquant ainsi la nature, il est rare qu'elle vous résiste. Les grands hommes eux-mêmes ne sont parvenus à nous laisser de grandes choses qu'à force de persévérance.

Newton a montré l'exemple de cette inévitable nécessité de la constance et de la continuité dans l'exercice de l'attention pour développer le pouvoir de l'intelligence.

On lui demandait un jour comment il était parvenu à ses admirables découvertes; il répondit simplement : *En y pensant toujours.* « Je « tiens, disait-il, le sujet de ma recherche constamment devant moi, « et j'attends que les premières lueurs commencent à poindre lente- « ment jusqu'à se changer en une clarté pleine et entière. »

Quiconque veut se servir de son intelligence et de l'adresse de ses mains peut arriver, suivant l'étendue de cette intelligence et de cette adresse, à laisser après lui des travaux plus ou moins utiles dont son pays lui saura gré un jour.

Dans l'exposé des travaux, on doit apporter une grande simplicité; car l'histoire nous apprend que la carrière scientifique d'un homme se réduit souvent à quelques faits généraux. Les travaux de détail exécutés pour arriver à la découverte de ces faits, les analyser et les décrire, peuvent être comparés à ces échafaudages dressés pour élever un édifice, et que l'on renverse, l'édifice une fois terminé. Néanmoins, ces travaux de détail restent consignés dans les recueils scientifiques, où l'on va les consulter au besoin, pour étudier les méthodes employées. Il résulte de là que presque toujours la vie scientifique d'un homme se résume en quelques phrases; mais ces phrases expriment des vérités éternelles, monuments impérissables du génie qui les a découvertes, et qui servent de jalons à ceux qui veulent étendre le domaine de la philosophie naturelle. Ainsi Képler est connu par ses trois fameuses lois, fruit de VINGT années de travail, et qui, en l'immortalisant, ont servi de point de départ à Newton, pour trouver les lois de la gravitation, dont l'action s'étend dans tout l'univers; c'est ainsi que Newton lui-même brille d'un grand éclat, pour avoir trouvé la composition de la lumière et les lois qui en dépendent; qu'Œrsted s'acquit une grande renommée pour avoir découvert l'action révolutive exercée par un courant électrique sur l'aiguille aimantée, et que Malus s'est illustré par la découverte de la polarisation de la lumière au moyen de la réflexion.

Pour obtenir de si grands résultats, qui peuvent être exprimés en peu de mots, il faut souvent multiplier les expériences à l'infini, et prendre en considération une foule de faits de détail qui passent inaperçus dans le monde.

Les philosophes, voués par goût et par passion à l'étude des sciences expérimentales, ne doivent pas cependant se borner à rechercher des faits isolés, parce qu'ils finiraient par en encombrer la science et par se perdre eux-mêmes au milieu de leurs découvertes; aussi doivent-ils s'attacher à trouver des lois générales à l'aide desquelles ils puissent les comprendre tous. La découverte de ces lois doit donc être le but constant de leurs travaux.

Les théories, à la vérité, servent bien à grouper les faits, pour en faciliter l'étude et en trouver les rapports mutuels; mais on ne doit y attacher de l'importance qu'autant qu'elles mènent à des découvertes nouvelles. Les théories qui sont infructueuses entre les mains de ceux qui cherchent à les appliquer, et qui sont insuffisantes pour expliquer les faits nouveaux, doivent être remplacées par d'autres plus appropriées aux besoins de la science. Au surplus, mieux vaut une bonne série de faits, bien coordonnés ensemble, qu'une mauvaise théorie, car l'expérience a prouvé depuis longtemps qu'en général les théories passent et que les faits restent.

Voyons actuellement sous quel point de vue il faut envisager la physique appliquée à la chimie et aux sciences naturelles.

La physique, considérée de la manière la plus générale, comprend tout ce qui concerne les propriétés apparentes des corps, et l'étude des phénomènes naturels ainsi que les lois qui les régissent.

Les traités de cette science publiés jusqu'ici renferment bien les principes que nous possédons à cet égard; mais ils disent peu de chose touchant l'influence qu'exercent, dans un grand nombre de cas, l'attraction moléculaire, la chaleur, la lumière et l'électricité, sur les propriétés générales des corps, alors que leurs molécules forment de nouveaux composés quand ces corps sont bruts ou inorganiques, ou sur leurs fonctions, lorsqu'ils sont organisés. De nouveaux développements feront mieux saisir ma pensée.

Les forces auxquelles sont soumis les corps organisés sont, pour les végétaux, les forces physiques, les affinités, plus la force vitale, base des phénomènes physiologiques, et qui cesse avec la vie; pour les animaux, ces trois mêmes forces, plus la force intellectuelle. Quant aux corps bruts ou inorganisés, ils ne possèdent que les deux premières. Dans les corps organisés, il y a lutte continuelle entre la force vitale

et les forces physiques, tandis que dans les corps inorganiques, elle n'a lieu qu'entre les dernières.

D'après cela, si l'on veut observer et étudier un fait, il faut commencer par s'assurer s'il est dû à l'action de ces forces réunies, à l'une ou à plusieurs d'entre elles, puis reconnaître la part de chacune d'elles à sa production.

Rechercher ce qu'il y a de physique et de chimique dans les phénomènes de la vie est une étude de la plus haute importance et qui a attiré depuis longtemps l'attention des physiologistes les plus habiles; mais il est probable que leurs investigations auraient été plus fructueuses, s'ils eussent possédé des connaissances suffisantes en physique, pour les diriger dans un travail de cette nature qui est hérissé des plus grandes difficultés. On conçoit très-bien que l'on puisse facilement s'égarer, surtout si l'on arrive avec des idées déjà arrêtées sur la cause des phénomènes. Celui qui attache une trop grande importance aux forces physiques ou chimiques ne voit dans la vie que des résultats de l'attraction ou des affinités. C'est ainsi que Tournefort a comparé l'accroissement des plantes à celui des minéraux, et que Malebranche a confondu l'organisation des animaux avec celle des machines. D'un autre côté, quelques physiologistes n'ont voulu voir et ne voient encore que des forces particulières, *sui generis*, dans lesquelles les forces physiques ou chimiques n'interviennent en rien. La vérité se trouve probablement entre ces deux extrêmes; aussi est-il indispensable de rechercher dans les phénomènes de la vie la part des forces physiques et chimiques, et celle qui est due aux forces vitales. Quelques exemples me feront mieux comprendre.

Dans la digestion, l'action chimique a la plus grande part à son accomplissement; si l'on enlève l'action vitale, aucun phénomène ne s'accomplit plus.

Dans la circulation du sang, il y a une force mécanique puissante qui réside dans le cœur, laquelle lance le sang dans les vaisseaux. Quel est le point de départ de cette puissance mécanique, quelle en est la cause? C'est une influence vitale, c'est une influence nerveuse, deux actions qui n'en font qu'une. En effet, détruisez les centres nerveux encéphalo-rachidiens ou ganglionnaires, le cœur cessera de battre et le sang ne passera plus dans les artères. C'est donc dans ce cas-ci, comme dans le précédent et dans mille autres, une action vitale primitive, qui a pour conséquence un effet physique ou mécanique. Une fois l'action mécanique ou chimique produite par l'influence de la force vitale, cette action ne se comporte pas comme

dans les corps inorganiques, attendu que l'influence vitale qui l'a produite la gouverne, la modifie et s'oppose dans certains cas à sa manifestation, tandis que, dans d'autres, elle la favorise et l'accélère.

Le rôle du physicien, dans cette circonstance, doit se borner à indiquer les procédés les plus simples et les plus précis à l'aide desquels on parvient à observer dans les phénomènes l'existence et l'influence des forces physiques, ainsi que les modifications qu'elles éprouvent de la part des forces vitales.

D'un autre côté l'irritabilité, cette propriété de la vie que possèdent les muscles des animaux, se développe, comme on sait, à l'aide des agents physiques ou chimiques, ou par l'acte de la volonté. Le physicien doit en faire une étude approfondie, afin d'établir la ligne de démarcation qui existe entre les effets dus aux forces physiques et ceux dépendant de la volonté.

Si l'on considère l'excitabilité dans les végétaux, cette propriété en vertu de laquelle la séve monte avec énergie dans les tiges et les feuilles vivantes, qui décompose l'acide carbonique sous l'influence de la lumière, on doit rechercher comment elle est modifiée par les agents impondérables, tels que la chaleur, la lumière et particulièrement l'électricité, qui préside très-probablement aux phénomènes de la vie, sans que nous puissions déterminer la part qu'elle y prend.

Le physicien doit examiner ensuite de quelle manière l'action capillaire et l'endosmose interviennent dans les phénomènes d'absorption; quelles sont les causes physiques et chimiques qui accélèrent, ralentissent ou détruisent ces phénomènes.

La germination doit attirer aussi son attention en ce qui concerne l'action qu'exercent sur elle les courants électro-chimiques, dont le mode d'action a toujours quelque chose qui frappe d'étonnement.

Les recherches relatives à la détermination de la température des parties intérieures du corps de l'homme et des animaux, sans produire de lésion sensible, ainsi que celles qui concernent la phosphorescence, que plusieurs de ces corps manifestent dans certaines circonstances, sont également du domaine de la physique appliquée.

Dans la nature inorganique, c'est-à-dire, dans la matière brute, comme les minéraux, les applications de la physique sont beaucoup plus étendues et aussi plus faciles à étudier, puisque l'action vitale n'est plus là pour dominer les forces physiques.

Un minérai est composé de parties réunies en vertu de forces dont on doit rechercher la nature. Pour étudier le mode d'arrangement de ces parties ou molécules, il faut appeler à son aide successivement la

cristallographie, l'optique, l'acoustique et même la phosphorescence. En raison de cela, la phosphorescence devra être exposée avec de grands développements; il en sera de même de l'électro-chimie, de cette science qui a fait de si rapides progrès depuis quarante ans, et dont les principes permettent d'étudier les actions lentes, de former bon nombre de substances minérales, d'expliquer l'altération de certaines roches, et de produire un grand nombre de composés que le chimiste n'a pas toujours la faculté d'obtenir.

Dans la physique appliquée, on doit exposer aussi les principes généraux de la physique terrestre, en y comprenant, bien entendu, la climatologie qui doit intéresser à un haut degré toutes les branches de l'histoire naturelle, en raison de l'influence qu'exercent les agents extérieurs sur tous les corps répandus à la surface du globe. Tel est le plan du Traité que j'offre au public. Mais avant d'entrer en matière, je vais passer rapidement en revue la marche que la physique générale a suivie depuis les temps les plus reculés jusqu'à nos jours, en indiquant l'influence qu'elle a exercée sur les progrès de la civilisation.

CHAPITRE II.

De la physique générale dans ses rapports avec les autres sciences et la civilisation, depuis les temps les plus anciens jusqu'au XVe siècle.

Jamais les intérêts matériels n'ont plus demandé aux sciences qu'à l'époque actuelle; il semblerait que les vérités péniblement élaborées chaque jour dans nos laboratoires n'aient d'autre destination que de servir aux arts. Le philosophe, dans sa retraite, résiste avec peine au mouvement rapide qui entraîne aujourd'hui, dans cette direction, toutes les intelligences.

Il suffit de passer en revue la marche que les sciences ont suivie depuis les temps les plus reculés jusqu'à nos jours, pour bien se pénétrer de leur véritable mission, et reconnaître comment elles ont contribué, de concert avec la morale, la littérature et les arts, aux progrès de la civilisation.

Si la morale, d'origine divine, règle la conduite de l'homme à l'égard

de lui-même, celle d'homme à homme, de nation à nation; si la littérature forme le langage, développe l'intelligence, et exerce une puissante influence sur le moral, en présentant sans cesse à l'esprit de nobles exemples; si les beaux-arts adoucissent les mœurs et perpétuent le souvenir des actions héroïques et des services rendus à la patrie, les sciences physiques ont particulièrement pour objet d'initier l'homme aux secrets de la nature en lui dévoilant ses lois, d'agrandir le cercle de ses idées et de fournir à la pratique des arts des principes sûrs qui éclairent l'industrie. Faute de documents historiques, on ne peut en suivre les développements progressifs, tant les premiers âges du monde enveloppent dans leur obscurité l'invention des choses; on peut dire néanmoins que la nécessité fit découvrir les éléments des sciences et des arts qui ont brillé tour à tour chez un petit nombre de nations civilisées. On les a vus, en effet, naître, se développer, puis s'éteindre pour reparaître dans d'autres contrées et y subir les mêmes révolutions, jusqu'à ce qu'enfin leur influence soit devenue assez puissante pour rendre impossible, pour ainsi dire, le retour à la barbarie. Nous savons encore que l'astronomie existait lors de la fondation des grands empires. Aussi, les observations qui nous ont été transmises d'âge en âge servent-elles aujourd'hui d'archives dans lesquelles on va puiser des documents pour fixer certaines époques historiques, remplir le vide que laissent entre elles de vagues traditions et renouer la chaîne des événements. C'est sous ce rapport que l'on a dit avec raison que le ciel servait à éclairer la terre. Sans entrer dans une discussion approfondie sur tout ce qui concerne le mouvement progressif des sciences, nous dirons que, 2,500 ans avant l'ère chrétienne, Babylone était sans arts et sans défense, et que les Chaldéens, s'en étant emparés, y apportèrent les éléments des sciences et des arts qui y furent cultivés dans un collége de prêtres philosophes, et s'y soutinrent avec un certain éclat jusqu'à la conquête de l'empire persan par Alexandre. Bien que nous n'ayons que de vagues traditions à cet égard, néanmoins, la grandeur et la magnificence de Babylone, au rapport des anciens, ne laissent aucun doute sur l'état avancé des arts dans ces temps reculés. De la Chaldée, ou peut-être de l'Inde, les lumières passèrent en Égypte, qui n'atteint un haut degré de civilisation que par la pratique des arts et les applications de la physique et de la chimie qui n'existaient pas encore comme sciences.

Le philosophe qui parcourt cette contrée pour y chercher des traces de cette ancienne civilisation, la trouve en effet couverte de vastes

monuments dont les débris épars lui montrent partout l'emploi de la sculpture, de la peinture, des émaux, des verres et des métaux précieux, à un degré de perfection qui fait encore l'admiration des archéologues, des savants et des artistes. Si, poursuivant sa course investigatrice, il interroge ces ruines gigantesques jusque dans leurs fondements, il y retrouve, particulièrement à Thèbes, détruite il y a environ 4,000 ans, les restes de constructions antérieures qui dénotent déjà une civilisation avancée; il se demande, mais en vain, à quelle époque il faudrait remonter pour en saisir les premiers rudiments, car de toutes parts il ne trouve qu'obscurité. Il n'en est pas ainsi s'il porte ses regards sur les antiquités astronomiques qui ont été l'objet d'études approfondies de la part de Fourier et ensuite de M. Biot; elles lui apprennent en effet que l'on peut faire remonter l'institution de la sphère égyptienne au XXVe siècle avant notre ère, et qu'en l'année Julienne, 3285 ans avant cette même ère, les Égyptiens avaient déterminé la vraie position dans le ciel de l'équinoxe du printemps et du solstice d'automne.

D'un autre côté, les écrits des anciens nous apprennent que les Égyptiens, sous leurs rois, se livrèrent avec une grande sagacité à l'étude de la nature et montrèrent une grande aptitude pour la culture des arts. Leurs philosophes s'attachaient en général à tout ce qui était utile, et faisaient consister le bonheur dans l'étude de l'homme et de la nature. Tel est le point de vue sous lequel on doit envisager les sciences, si l'on veut leur faire accomplir leur noble mission.

Pour leur donner un caractère sacré, les hommes instruits et éclairés furent attachés au sacerdoce, qui réunissant alors la religion, l'administration de la justice et l'enseignement des sciences, des arts et des lettres, avait la force morale nécessaire pour gouverner despotiquement. Aussi les prêtres gardèrent-ils mystérieusement le dépôt des connaissances humaines, qui pouvaient seules leur assurer la domination exclusive des peuples; état de choses qui s'opposait évidemment à leur développement.

L'art de traiter les métaux et de faire diverses préparations utiles, ainsi que celui de polir les pierres précieuses et de les graver, fut porté très-loin en Égypte; on y fabriquait des tissus de lin et de laine d'une finesse remarquable, et qui présentaient aux yeux les couleurs les plus brillantes et les plus variées; la sculpture et la peinture ornaient les édifices. Que d'essais, que d'expériences n'avait-il pas fallu faire pour atteindre un degré de civilisation aussi avancé !

Ce peuple n'était pas moins habile dans la mécanique, comme l'at-

testent les monuments gigantesques qu'ils ont élevés à leurs dieux et à leurs rois ; ils connaissaient en outre l'hydraulique, dont les débordements du Nil leur faisaient une loi de s'occuper pour en répandre au loin les bienfaits. Tout tend donc à prouver que les sciences et les arts avaient déjà atteint un certain degré de perfection en Égypte bien longtemps avant l'ère chrétienne. C'est donc dans cette contrée, si l'on veut s'appuyer sur des monuments encore existants, que l'on doit étudier les premiers éléments des sciences. C'est aussi à leurs traditions historiques que l'on a recours pour acquérir quelque notion sur les premières vues théoriques concernant les changements chimiques qu'éprouvent les corps, vues qui ont été plus ou moins modifiées par les philosophes grecs.

Bien que les Égyptiens connussent un grand nombre de faits relatifs à la physique générale, cette science n'existait néanmoins pas encore ; car ils n'avaient pas songé à rassembler toutes les connaissances éparses, et à les disposer dans un ordre méthodique qui permît de les déduire les unes des autres ; ils n'avaient que des notions vagues, plutôt poétiques que philosophiques, sur les causes des phénomènes. Les peuples de la basse Égypte, par exemple, accoutumés à voir leurs terres sableuses fertilisées par les débordements du Nil, durent penser que l'eau, sous des modifications différentes, donnant naissance à des matières diverses, devait être considérée comme un élément. Cette doctrine servit de base à la première école grecque, et fut le point de départ de systèmes plus ou moins erronés.

Avec une civilisation aussi avancée, on dut accourir de toutes parts pour s'instruire ; aussi, tous les hommes illustres de l'antiquité qui exercèrent une grande influence sur leur siècle vinrent-ils chercher des connaissances en Égypte, lesquelles sont parvenues jusqu'à nous à travers le moyen âge. Les Grecs, au rapport d'Hérodote, furent de ce nombre ; ils firent de nombreux emprunts aux Égyptiens, qui n'adoptèrent aucune de leurs institutions. Tout en puisant à bonne école, ils n'en conservèrent pas tous les principes, tant l'esprit de discussion les éloigna de la philosophie positive, en honneur sur les bords du Nil.

Thalès, né à Milet, 640 ans avant J. C., est le premier qui ait transporté d'Égypte dans sa patrie les connaissances conservées dans les collèges de prêtres. Il croyait la terre sphérique et placée au centre du monde ; il connaissait la petite Ourse, pouvait prédire les éclipses ; il savait que la lune n'est éclairée que par la lumière qu'elle reçoit du soleil, etc., etc.

Il ouvrit une école à Milet pour y enseigner publiquement la géométrie, l'astronomie, et sa nouvelle doctrine. L'impulsion donnée par Thalès se communiqua dans toute la Grèce. Les philosophes avaient à choisir, pour arriver à la vérité, entre la méthode expérimentale et la méthode *à priori*. Ils préférèrent malheureusement cette dernière, qui régna pendant deux mille ans dans la science, et retarda le développement de la civilisation en la privant longtemps du puissant appui que lui donnent aujourd'hui les grandes découvertes scientifiques dont s'honorent les derniers siècles. Néanmoins, de temps à autre on vit des hommes supérieurs essayer de secouer le joug des écoles, mais sans trouver d'imitateurs. Au surplus, laissons parler l'histoire : Anaximandre apprit le premier aux Grecs à tracer des cartes géographiques et des cadrans solaires. Anaxagore ouvrit une école à Athènes, où il enseigna que la matière existait de toute éternité ; qu'elle renfermait des parties élémentaires de diverses natures ; que les parties similaires, en se rapprochant, pouvaient donner naissance à des corps différents ; que l'arc-en-ciel était produit par la réfraction des rayons solaires, etc., etc.

Thalès avait pris l'eau pour principe universel, Phérécide choisit la terre, Héraclite le feu, et Anaximènes l'air. D'autres philosophes prirent successivement pour principe plusieurs de ces éléments ; il y avait là progrès, car la nature devait leur montrer chaque jour qu'elle ne disposait pas seulement d'un seul élément pour constituer les corps.

La secte italique, ayant pour chef Pythagore, né 534 ans avant J. C., donna une autre direction aux études en adoptant la méthode expérimentale. Son fondateur, auquel la physique doit d'importantes découvertes, se fit initier, comme Thalès, aux mystères de l'Égypte, afin de rapporter dans sa patrie les connaissances scientifiques de cette contrée. A part leurs erreurs sur les causes des grands phénomènes de la nature, Pythagore et ses disciples eurent des idées assez justes sur la disposition générale des diverses parties du système solaire, et sur la place que devait occuper la terre dans ce système. Ils annoncèrent en effet que la terre tourne, que les comètes ont des révolutions périodiques, et que les étoiles sont autant de soleils, autour desquels gravitent d'autres astres. Voilà, dans l'enfance de la science, des vérités qui sont restées ignorées ou combattues jusqu'à Galilée !

Les expériences de Pythagore sur les vibrations des corps sont pleines d'intérêt. Passant un jour devant l'atelier d'un forgeron, il

entendit diverses consonnances produites par des marteaux qui frappaient sur une enclume. En étudiant ce phénomène, il ne tarda pas à reconnaître que la variété des sons provenait du poids différent des marteaux. Pour tout autre, cette observation eût été sans résultat; pour Pythagore, elle fut le germe d'une expérience importante. Il tendit des cordes de même grosseur et de même longueur, et suspendit différents poids à l'extrémité de chacune d'elles. Après quelques essais, il parvint, en faisant vibrer ces cordes, à exprimer en nombre les rapports des sons. Il rendit en outre un grand service à la philosophie en répandant le goût des mathématiques, qu'il cultiva avec succès.

Les principes de Pythagore et de ses élèves, qui essayèrent de les soutenir dans l'école de Sicile, malgré les agitations politiques auxquelles cette île était en proie, furent bientôt oubliés des philosophes grecs, qui s'étaient habitués à rapporter tous les phénomènes à des théories qu'ils s'étaient créées, et à ne discuter les faits qu'autant qu'ils pouvaient servir à appuyer ces mêmes théories, s'imaginant en outre qu'il était possible de pénétrer tous les secrets de la nature, même les choses qui échappent à l'observation. Dans une telle disposition d'esprit, les obstacles ne pouvaient les arrêter. Ils entassaient préjugés sur préjugés, se contentant de notions vagues et basées sur des systèmes qui étaient adoptés avec empressement par les peuples. L'esprit de système était donc l'esprit dominant; aussi chaque philosophe en imaginait-il un pour expliquer la nature à sa manière.

Aristoxène conçut la doctrine de l'harmonie, au moyen de laquelle il voulut prouver que la pensée et la sensibilité ne sont que des modifications de la matière.

Leucippe et Démocrite imaginèrent la doctrine des atomes qui fut défendue plus tard par Épicure, et qui règne aujourd'hui dans la science. Suivant ces philosophes, le vide et la matière composaient essentiellement l'univers, et étaient éternels, attendu que rien ne sort du néant et que rien ne saurait y rentrer. Tous les corps étaient composés d'atomes laissant entre eux des distances immenses relativement à leur dimension, et qui devenaient libres aussitôt après la destruction des corps. Ces atomes, dont la dureté était parfaite, avaient des formes variées, carrées, crochues ou autres; ils étaient toujours en mouvement, se précipitaient dans le vide, se fuyaient, s'accrochaient, et s'unissaient pour former des corps qui eux-mêmes étaient décomposés par la rencontre d'autres atomes.

Leucippe est celui de tous les philosophes grecs qui a donné les

idées les plus justes sur la théorie des atomes, en annonçant que leur forme variait avec la nature des corps; qu'en changeant leur ordre et leur disposition, il en résultait des corps différents. C'est aussi le point de vue sous lequel nous envisageons aujourd'hui l'isométrie.

On conçoit que des opinions si diverses, qui n'étaient point appuyées sur l'expérience, durent donner lieu à de vives discussions; aussi vit-on toutes les écoles de la Grèce en proie à des disputes sur la nature du temps, de l'espace, de la matière.

Après ces philosophes parut Platon, né vers l'année 434 avant l'ère chrétienne. Philosophe lui-même à vingt ans, après avoir entendu Socrate, il reconnut pour cause universelle un Être suprême et prit les quatre éléments pour base de tous les corps, mais il s'est illustré plutôt par ses vues philosophiques que par ses travaux en physique.

A ces divers systèmes succéda celui d'Aristote, qui, en homme éminemment supérieur, se mit à étudier la nature pour l'interpréter; mais, comme tous les philosophes grecs, dominé par l'esprit de système, il paya un tribut à son siècle, en fondant ses doctrines sur des causes occultes, doctrines qui furent suivies dans les écoles pendant deux mille ans, mais qui disparurent sans retour depuis Bacon et Galilée. Aristote, né à Stagyre, en Macédoine, 384 ans avant l'ère chrétienne, fut chargé de l'éducation d'Alexandre pendant huit ans; il se retira ensuite à Athènes, lorsque ce conquérant partit pour l'Asie; mais il ne cessa pas d'entretenir une correspondance suivie avec son élève, qui avait contracté près de lui le goût des sciences et le désir de contribuer à leur progrès; ainsi se hâta-t-il de procurer à Aristote les moyens d'étude qu'il trouvait dans les contrées qu'il parcourait en vainqueur. Des milliers de chasseurs et de pêcheurs furent par lui chargés de rassembler les animaux et autres objets qui pouvaient être utiles à son maître pour l'étude de l'histoire naturelle. Ajoutons qu'Aristote avait une âme ardente pour l'étude; qu'il était possédé du désir d'acquérir des connaissances universelles, désir qui était justifié par les éminentes qualités qu'il avait reçues de la nature et les grands moyens d'instruction qu'il recevait d'Alexandre. Aussi immortalisa-t-il son nom pour avoir coordonné les connaissances humaines éparses et les avoir réunies dans un corps de doctrines, d'après les règles de la logique. Thalès avait eu la même pensée, mais non les moyens nécessaires pour exécuter ce vaste projet.

La physique d'Aristote est néanmoins bien inférieure à son histoire naturelle; il ne pouvait guère en être autrement à cette époque où les philosophes étaient plutôt occupés à façonner la nature à leur guise

qu'à décrire les phénomènes pour en recueillir des faits conduisant à des lois. Toutefois, c'est lui qui jeta les bases de la météorologie, et qui fit sentir de nouveau la nécessité d'allier l'étude des mathématiques à celle de la physique. Néanmoins Aristote, qu'on regarde avec raison comme le créateur de l'histoire naturelle, embrassa trop d'objets à la fois pour se former une idée nette de chacun d'eux. Il commit en outre la faute grave d'établir des principes généraux pour les appliquer à des cas particuliers, méthode pernicieuse à la recherche de la vérité dans les sciences en général. Quoi qu'il en soit, son système de philosophie, fondé sur la raison, ne pouvait manquer d'avoir un immense succès; on le vit tour à tour suivi et abandonné par les sectes chrétiennes, et reprendre faveur chez les Arabes qui, dans le moyen âge, l'introduisirent en Europe.

Sans entrer dans l'examen des principes sur lesquels repose son système, je dirai qu'Aristote considérait l'univers comme une vaste machine composée de roues qui, se mouvant par elles-mêmes et s'engrenant entre elles, produisaient des effets dépendants de la nature des principes dont elles étaient composées. Malgré des bases aussi absurdes, qui ne pouvaient le conduire à un système rationnel des phénomènes naturels, il nous a transmis des notions qui prouvent qu'il s'était réellement occupé d'expériences. On trouve, en effet, dans ses ouvrages, des détails sur la différente conductibilité des corps pour la chaleur. Il y parle de la pesanteur de l'air; de la forme circulaire de l'image formée par des rayons solaires qui passent par une ouverture de forme circulaire, et dont il donne l'explication; du refroidissement produit par un ciel serein et de la formation de la rosée qui en résulte; puis de la figure de la terre, déduite de la rondeur de l'ombre que notre globe projette sur la lune dans les éclipses de cet astre. Néanmoins, il s'est contenté en physique de notions vagues, d'observations incomplètes et souvent erronées, qui ne pouvaient le conduire à la découverte des véritables lois de la nature. Nous ferons de plus remarquer qu'en admettant des causes occultes pour expliquer des phénomènes dont il ne pouvait rendre compte, il entravait la marche de l'esprit humain dans les recherches expérimentales. En effet, suivant lui, les impressions produites sur nous par des objets extérieurs étaient dues à des causes en vertu desquelles elles étaient ce qu'elles devaient être; causes tellement cachées, qu'il était inutile de les rechercher puisqu'on ne pouvait jamais arriver à les découvrir. Dire *à priori* qu'une chose est introuvable, c'est juger sans examen. Il est hors de doute qu'il y a des limites que l'esprit humain

ne saurait franchir ; mais c'est l'expérience seule qui doit nous l'apprendre, et non des théories dont le temps fait toujours justice quand elles ne sont pas fondées sur la raison. Les ouvrages d'Aristote devaient donc fournir des armes à la controverse, et avoir un immense succès à des époques où les discussions scolastiques et les subtilités de raisonnement étaient en grande faveur et conduisaient à la célébrité.

Voilà, en peu de mots, les principes de philosophie naturelle sur lesquels la physique reposa pendant près de deux mille ans, et qui furent renversés du moment que l'on eut reconnu que, pour arriver à la connaissance des choses, il fallait observer et étudier ces choses. En général, les philosophes grecs s'attachaient plutôt à des sujets purement intellectuels qu'à l'étude des phénomènes naturels; aussi portèrent-ils l'art de la discussion et de l'analyse au plus haut degré de perfection, sans résultats utiles pour l'avancement des sciences. Davy a dit avec raison des Grecs (*Introduction des Éléments de philosophie chimique*) « qu'ils avaient, comme par instinct, le sentiment de tout ce qui « est beau, grand et brillant ; que leurs philosophes n'errèrent point « par manque de génie, ni même d'application, mais seulement parce « qu'ils parcoururent une fausse route ; qu'ils raisonnèrent plutôt « d'après un système imaginaire, touchant la nature, que d'après un « ensemble perceptible à la vue et au tact.

Ils s'étaient imaginé, par exemple, qu'en prenant pour point de départ les idées théoriques les plus simples, ils devaient pouvoir y rattacher les principaux phénomènes ; ainsi, le cercle étant la plus régulière des lignes, la révolution des corps célestes devait s'effectuer suivant des cercles et avec des mouvements réguliers ; s'occupant peu de vérifier par l'observation si l'hypothèse était exacte ou non, l'erreur des Grecs vint de ce qu'ils avaient cru que la méthode qui avait fait découvrir des vérités importantes en mathématiques, dont tous les faits s'enchaînent, était applicable à la physique.

On doit cependant, parmi les anciens et comme physicien, mettre hors de rang Archimède, né vers l'an 267 avant Jésus-Christ et dont la fin malheureuse est connue de tout le monde. Outre ses grandes connaissances en mathématiques, qui le mettent au rang des premiers géomètres de l'antiquité, on lui doit, à ce qu'il paraît, les premières idées sur la réfraction astronomique, et la découverte du principe à l'aide duquel on détermine la densité des corps. Quant à sa réputation de grand mécanicien, elle est immense, bien qu'on ait

peut-être exagéré l'usage des machines qu'il imagina pour éloigner les vaisseaux romains des remparts de Syracuse ; néanmoins, ses découvertes en mécanique qui nous sont parvenues sont assez importantes pour justifier sa grande renommée.

La physique n'existait donc pas réellement comme science chez les Grecs, puisque les vérités connues de leur temps étaient encore éparses, malgré les efforts de Thalès et d'Aristote pour les réunir. Il en fut de même chez les Romains, plus occupés de conquêtes que d'études scientifiques. Aussi se bornèrent-ils à répéter ce que les Grecs avaient avancé, sans chercher à discuter si les opinions émises par ceux-ci étaient erronées ou non. Après s'être rendus maîtres de l'Italie, ils portèrent leurs armes au delà et n'eurent d'abord aucun respect pour les établissements littéraires et scientifiques des peuples vaincus. Ils ne commencèrent à prendre du goût pour les arts qu'après la prise de Syracuse, d'où Marcellus enleva les statues et les vases pour en décorer les temples de Rome. A cette époque, cette ville, qui devait devenir la capitale du plus vaste empire qui ait jamais existé, n'avait encore ni poëtes, ni philosophes, ni historiens, ni orateurs. Nous ne suivrons pas le développement de la philosophie chez les Romains, mais nous dirons seulement qu'on peut leur reprocher, comme aux Grecs dont ils devinrent les élèves après les avoir vaincus, d'avoir été avides du merveilleux ; d'avoir accueilli, sans discernement, les traditions souvent les plus absurdes, et de les avoir réunies dans des corps informes de doctrine. Précisons les faits.

Au rapport de Cicéron, la géométrie était peu cultivée à Rome, et l'astronomie, qui était entachée de magie, se bornait à prédire les éclipses. Les discussions scientifiques roulaient principalement, comme du temps de Leucippe et de Démocrite, sur la métaphysique des atomes et le vide.

Lucrèce, contemporain de Cicéron, dans son mémorable poëme *de Naturâ rerum*, expose le précis des opinions d'Épicure, comparées à celles d'autres philosophes célèbres. On y trouve des notions assez exactes, quoique vagues, sur plusieurs points de la physique. Il avance, comme du reste on devait le savoir depuis Archimède, que la chute des graves ne s'effectue pas de la même manière pour tous les corps, et que les corps sont composés de matière et de vide ; il décrit avec exactitude les effets du tonnerre, etc. On trouve dans Sénèque des observations sur le grossissement que produisent les globes de verre par réfraction, et les miroirs courbes par réflexion, et d'autres sur les couleurs de l'iris qui se forme dans les prismes de verre ;

sur la diminution de la chaleur dans les hautes régions de l'atmosphère; il parle des différentes couleurs des étoiles, et dit que les comètes ont un cours régulier, que les tremblements de terre sont dus à une chaleur centrale, etc., etc.

Pline, dans son *Histoire naturelle*, fait de larges emprunts à Théophraste et à Aristote; il y rapporte une foule d'observations relatives aux arts, et y donne quelques notions sur le dégagement de l'électricité par frottement, et sur divers phénomènes électriques. Quant à ses principes de physique, ils sont à peu près ceux de Platon et d'Aristote, qui régnaient alors dans toutes les écoles.

Les anciens, du temps de Pline et même avant, connaissaient la propriété dont jouit la torpille, de produire un engourdissement quand on la touche avec une pique ou une baguette. Galien rapporte le même fait. Plutarque dit que ce poisson fait éprouver un engourdissement aux pêcheurs, par l'intermédiaire de leurs filets, et que si l'on verse de l'eau sur une torpille vivante, la sensation se propage jusqu'à la main à la faveur de l'eau tombante.

Appien a décrit les deux organes qui possèdent la faculté de donner des commotions, dont les anciens se servaient comme d'un moyen curatif, particulièrement dans la goutte, la paralysie, etc. D'autres observations analogues prouvent que les Grecs et les Romains avaient observé avec soin le phénomène de la torpille, dont l'origine électrique est aujourd'hui bien démontrée.

Vossius rapporte que, de son temps, on faisait usage de la commotion de la torpille pour guérir les maux de tête invétérés, et qu'on l'employait comme remède contre la goutte.

Les anciens paraissent s'être occupés beaucoup des propriétés du tonnerre; suivant eux, faire descendre le tonnerre ou la Divinité elle-même était même chose. Selon Pline, Numa avait eu fréquemment ce pouvoir. On a été même jusqu'à dire que le procédé à l'aide duquel on retire des nuages le fluide électrique, était connu des anciens et en partie de Numa Pompilius, et que Tullus Hostilius, son successeur, périt pour avoir maladroitement employé ce dangereux procédé. On trouve en effet dans Pline ce passage remarquable relatif à Tullus Hostilius: « Dans le moment où il évoquait la descente de la foudre par le procédé de Numa, mais maladroitement, Tullus fut frappé de la foudre. *Quod scilicet fulminis evocationem imitatum parum ritè, Tullum Hostilium ictum fulmine*. Plin., lib. II, c. 53. » On trouve encore, dans Lucain, un passage remarquable relatif au même sujet.

Aruns, savant étrurien, instruit dans les mouvements du tonnerre,

est dit avoir rassemblé les feux de l'éclair dispersés dans l'air, et les avoir ensevelis dans la terre.

...... Aruns dispersos fulminis ignes
Colligit, et terrâ mœsto cum murmure condit.
LUCAN., *Phars.*, *I*, 606.

Il est impossible de s'expliquer avec plus de précision sur l'emploi des paratonnerres pour soutirer la foudre. Ce passage ne doit pas étonner; car les Étrusques, au rapport des auteurs anciens, et à en juger par les antiquités qui nous restent, avaient une civilisation fort avancée à une époque très-reculée.

L'astronomie, entachée de magie, fit de tels progrès à Rome pendant le premier siècle de l'ère chrétienne, que les astronomes combattirent les astrologues, et s'efforcèrent de démontrer l'erreur de leur prétendue science. Mais ces attaques ne servirent qu'à l'accréditer davantage, et bientôt après tout l'empire romain crut à l'astrologie. Plusieurs empereurs même partagèrent cette erreur.

D'un autre côté, les attaques réitérées des barbares, et la lutte entre le christianisme et le paganisme, qui devint si vive que l'on quitta les sciences positives, quoique encore dans leur enfance, pour se livrer à des sujets purement spéculatifs, arrêtèrent non-seulement pendant longtemps les études scientifiques, mais finirent même par les anéantir presque entièrement pendant plusieurs siècles.

Mais avant d'indiquer quelles étaient ces études dans le moyen âge, arrêtons-nous un instant pour parler de la chimie, considérée plus tard comme une des branches de la physique générale, et qui a contribué à l'impulsion que celle-ci reçut dans le XVe siècle, en appelant continuellement l'attention des philosophes sur l'art des expériences, sans lequel la physique ne saurait exister.

La chimie, comme science, était inconnue des anciens; cependant plusieurs peuples, et en particulier les Égyptiens, cultivèrent avec succès, comme on l'a vu précédemment, les applications de cette science aux arts, sans en connaître les principes. Ce peuple était surtout habile dans l'art de teindre les étoffes, de travailler les métaux, le verre et les émaux, et colorer ces derniers de diverses teintes; il savait purifier la soude ou natrum, et retirer la potasse des cendres.

Les Phéniciens avaient également des connaissances assez étendues dans les arts qui dépendent de la chimie. Ces peuples connaissaient l'usage du cuivre, de l'or, de l'argent, du plomb, de l'étain et du fer; ils savaient retirer ces métaux de leurs minerais, les allier entre eux, et produire divers composés métalliques, tels que la litharge,

les vitriols ; ils connaissaient aussi l'usage des liqueurs fermentées. Malgré toutes les connaissances qu'exigeaient les opérations préalables pour obtenir ces composés, ils ne possédaient encore que des règles pratiques qui, réunies, ne formaient pas un corps de doctrine. Les arts chimiques passèrent des Égyptiens chez les Grecs et les Romains, qui s'occupèrent peu des connaissances scientifiques sur lesquelles ils reposaient, puisque leurs philosophes n'en ont pas fait mention. Voici quelques faits signalés par eux :

Suivant Laërce Diogène, Démocrate s'était occupé à imiter les pierres précieuses.

Dioscoride, qu'on suppose avoir été le médecin de Cléopâtre, avait indiqué le moyen de retirer le mercure de sa mine par la sublimation, etc. Mais toutes ces assertions ne suffisent pas pour prouver que la chimie existât comme science, il faut remonter jusqu'au VII[e] ou VIII[e] siècle pour en apercevoir les premiers rudiments ; mais avant de le prouver, revenons à l'état dans lequel se trouvait la physique générale en Europe dans les premiers siècles de l'ère chrétienne, alors que, de toutes parts, l'empire romain croulait sous les coups réitérés des barbares. Peu à peu les ténèbres couvrirent les ruines de l'empire d'Occident, et menacèrent bientôt celui d'Orient.

Les Grecs, entourés de barbares, gouvernés par des princes inhabiles et ignorants, accablés sous le poids de guerres intestines et étrangères, virent bientôt s'éteindre les sciences, les arts et la littérature, qui avaient fleuri, surtout ces derniers, pendant tant de siècles parmi eux. La destruction totale de l'idolâtrie entraîna celle des différentes sectes des philosophes de l'antiquité, et fit fermer les écoles où les sciences étaient enseignées par des païens. La lutte entre les deux religions devint si grande que l'une s'efforçait d'anéantir l'autre.

L'esprit de discussion qui avait pris naissance chez les Grecs, et dont nous avons signalé la funeste tendance pour l'avancement des sciences physiques, ne tarda pas à être partout à la mode. L'étude des choses fut négligée pour raisonner sur les mots ; mais peu à peu la barbarie fit évanouir les lueurs que la dialectique avait conservées, et les Grecs furent eux-mêmes plongés dans les ténèbres.

Dans les VI[e] et VII[e] siècles, Justinien, qui voulait abattre l'idolâtrie dans l'Occident, détruisit les écoles, et en particulier celles d'Athènes ; il ne conserva que celles d'Alexandrie, dont les chaires étaient occupées par des chrétiens ; mais bientôt elles furent anéanties à leur tour. Il n'existait donc plus alors d'établissements scientifiques, aussi les astrologues devinrent-ils les philosophes par excellence, et régnè-

rent-ils sans partage sur les esprits, qu'ils dirigeaient à leur gré. Néanmoins, sous Justinien, il existait quelques hommes de mérite, tels qu'Anthémius et Isidore, sortis de l'école du philosophe Proclus, qui, au commencement du VIe siècle, ranima le goût et l'étude des mathématiques dans la Grèce. Au rapport d'Agathias, continuateur de Procope de Césarée, Anthémius était un ingénieur habile, joignant la connaissance de la géométrie à celle de la physique. Justinien le chargea de reconstruire l'eglise de Sainte-Sophie. Cet homme, supérieur à son siècle, avait quelque idée de la force expansive de la vapeur, autant qu'on en peut juger d'après les détails dans lesquels entre Agathias.

Tel fut l'état des choses jusqu'au commencement du VIIIe siècle, où Léon l'Isaurien, ce furieux iconoclaste, enveloppa dans la même proscription les sciences, les arts, les images. Son aveuglement était tel, qu'il fit brûler, la nuit, dans leurs maisons, avec tous leurs livres, douze ecclésiastiques, ses conseillers, qui ne partageaient pas son horreur pour les images. Tout semblait donc concourir à l'anéantissement des sciences, et tous les efforts de l'esprit humain durant toute l'antiquité, en Égypte, en Grèce et dans l'empire, auraient été perdus pour la civilisation, si les livres échappés à la proscription générale n'eussent été conservés dans les communautés religieuses.

Saint Benoît, qui, en 543, fonda le premier ordre monastique en Occident, sur le mont Cassin, a donc droit, sous ce rapport, à notre reconnaissance. La règle de son ordre était de prévenir la vie purement contemplative que l'on reprochait aux moines d'Orient. En conséquence, elle recommandait le travail manuel, et faisait un devoir de la lecture et du travail intellectuel. Néanmoins, les bénédictins ne parurent en France que vers le commencement du VIIe siècle ; et, bientôt après, il se forma de toutes parts des couvents qui eurent d'abord des bibliothèques, et plus tard des écoles. Les travaux littéraires et scientifiques furent l'apanage des communautés religieuses, et, en particulier, de celles qui suivaient la règle de Saint-Benoît ; aussi ne vit-on pas un seul auteur, pendant un grand laps de temps, qui n'appartînt au cloître. A la vérité, les sciences physiques n'y gagnèrent d'abord rien ; mais plus tard elles reçurent une impulsion par les travaux de quelques moines, qui les enrichirent de découvertes importantes dont je parlerai bientôt. Mais avant, assistons à la renaissance des sciences et des arts.

Par une de ces singularités dont l'histoire ne nous offre qu'un seul exemple, le dépôt des connaissances humaines en Orient fut recueilli,

conservé et mis au jour dans le moyen âge par un peuple qui avait été plongé dans la barbarie pendant toute l'antiquité, et chez lequel les lumières ne brillèrent pendant quelques siècles que pour s'éteindre ensuite tout à fait. Les Arabes, à l'époque où Mahomet les asservit, étaient dans l'ignorance la plus profonde, état favorable aux vues politiques de ce conquérant; aussi se servit-il de l'ascendant de sa religion pour empêcher que les sciences ne pénétrassent parmi eux. Ce n'est que vers le VIIIᵉ siècle, sous les Abbassides, que les Arabes commencèrent à sortir de la barbarie dans laquelle l'islamisme les avait maintenus. Les Abbassides appelèrent près d'eux des médecins chrétiens, qui répandirent peu à peu en Arabie le désir d'acquérir des connaissances positives, connaissances qui flattaient singulièrement l'esprit de ce peuple, avide du merveilleux.

Ils firent rechercher les livres scientifiques épars, écrits en différentes langues, et en confièrent la traduction à des chrétiens. C'est ainsi que les œuvres d'Aristote prirent faveur parmi eux et leur inspirèrent le goût du péripatétisme et de la médecine. Le calife Mahmoud, qui régnait au commencement du IXᵉ siècle, répandit plus tard l'étude des mathématiques qu'il cultiva lui-même avec passion. Il employa toute son influence pour populariser la philosophie grecque. Les successeurs de cet homme éclairé encouragèrent les sciences, qui finirent par se répandre dans tous les États soumis à l'islamisme : aussi vit on en Asie, en Afrique, en Espagne, et particulièrement a Cordoue, des écoles où l'on enseignait la médecine, l'astronomie, les mathématiques et la philosophie, écoles fréquentées même par des chrétiens. Cette civilisation avancée pour le temps dura jusqu'au XIVᵉ siècle, époque où Tamerlan dévasta l'Asie.

Bien que les sciences, les arts et la littérature aient été en honneur chez les Arabes, néanmoins, leur prédilection pour Aristote, dont ils adoptèrent les principes sans les comprendre, contribua à les égarer. Ils eurent continuellement recours à des commentateurs qui défigurèrent tellement ces principes, qu'il était impossible de les retrouver au milieu de ce chaos. Des sectes de péripatéticiens se formèrent de toutes parts, et chacune, croyant avoir saisi la pensée d'Aristote, combattait toutes les autres et lançait contre elles l'anathème. L'étude de la philosophie portait donc plutôt sur le mécanisme des propositions que sur les idées et les faits, et fournissait par conséquent des armes à la controverse.

Les Arabes cultivèrent néanmoins avec succès la géométrie, l'as-

tronomie, la médecine, et surtout la chimie. Le plus célèbre d'entre eux est Gheber-Aben-Moussa-Djafa-Alsofi, qui florissait dans le VIIIe siècle, et que l'on regarde comme le fondateur de l'école arabe. On lui doit la découverte de l'alambic, du sublimé corrosif et de l'acide nitrique. Les Arabes ont encore découvert l'eau régale, le nitrate d'argent et diverses préparations pharmaceutiques qui passèrent en Europe, par l'intermédiaire de ceux qui fréquentaient leurs écoles. Mais la chimie ne fut cultivée par les Arabes que comme une branche d'une autre science, de la science par excellence selon eux, qui prit naissance vers le VIIe siècle de l'ère chrétienne, et à laquelle la physique et la chimie doivent d'avoir mis en faveur la méthode expérimentale comme moyen de recherches : je veux parler de l'alchimie.

Dans les auteurs anciens on ne trouve rien qui ait trait à cet art. Pline rapporte seulement que Caligula fut le premier qui prépara de l'arsenic pour le transformer en or, et qu'il n'arrêta ses recherches que parce que la dépense surpassait le profit. Mais il est probable qu'il ne fit que séparer l'or d'un minéral arsenifère; ce qui paraît certain, c'est que cet art prit naissance chez les Arabes; qu'il fut répandu en Europe par Raymond Lulle de Majorque, dans le XIIIe siècle, par Arnaud de Villeneuve d'Aragon, au commencement du XIVe siècle, et qu'il eut ensuite pour adeptes Azot, Paracelse et autres.

L'alchimie avait pour but principal la transmutation des métaux; ses partisans pensaient que tous les métaux renfermaient une seule et même substance, le métal par excellence, et dont la pureté était masquée par la présence de substances étrangères; suivant que ces dernières se trouvaient en plus ou moins grande quantité, le mélange était plus ou moins grossier. L'or était le composé qui s'approchait le plus du principe primitif. La substance qui pouvait transformer toutes les autres en or ne devait opérer ce changement qu'en enlevant les matières étrangères qui altéraient sa pureté; cette même substance devait enlever aussi du corps humain les principes morbides qui altèrent les fonctions vitales : c'était la pierre philosophale, la panacée universelle. En s'attachant à cette chimère, les alchimistes, je le répète, ont mis sur la voie des méthodes expérimentales pour interroger la nature, et ont contribué par là à la grande impulsion que reçurent plus tard les sciences physiques et chimiques.

On conçoit, jusqu'à un certain point, comment on crut dans l'origine à la transmutation des métaux. En voyant, sous l'influence d'opérations nouvelles, un minerai d'une apparence grossière se

transformer en métal pur, les mineurs durent penser qu'il n'était pas impossible d'obtenir les métaux les plus précieux en opérant la purification des autres. C'est une fatale conséquence de l'erreur où étaient tombés les Grecs, qui avaient admis sans examen que les corps n'étaient formés que d'un très-petit nombre d'éléments, et que l'on pouvait arriver à la connaissance des choses au moyen de principes simples. On voit par là quelle influence les sciences ont exercée sur la civilisation. Les Arabes conservèrent donc le foyer des lumières intellectuelles au milieu des ténèbres qui couvraient alors tout l'Occident, et dont les monastères recueillirent d'abord quelques faibles rayons.

En Occident, jusqu'au VIIIe siècle, il n'existait d'écoles que dans les cathédrales et dans quelques communautés, pour le besoin des ecclésiastiques. Dans ces temps de barbarie on prit pour guides un certain Capella, né en Afrique dans le Ve siècle, et qui avait écrit quelques ouvrages en latin sur les sciences et les arts, puis, dans le VIe siècle, Cassiodore, sénateur romain. Les ouvrages de ces auteurs n'étaient que des compilations propres tout au plus à conserver quelques documents relatifs aux sciences. Cet état de choses subsista jusqu'à ce que Charlemagne, s'étant rendu maître d'un vaste empire, et alors que les Français commençaient à respirer sous la protection de ses lois, sentit la nécessité, pour civiliser ce peuple, de répandre l'étude des sciences, des arts et de la littérature, dont on le regarde, à juste titre, comme le restaurateur.

Pour donner l'exemple, il se livra lui-même à l'étude, vingt-cinq ans après son avénement au trône, c'est-à-dire, vers 794. Ce grand monarque prit pour maître un nommé Flaccus Albinus Alcinnus (*Alcuin*), diacre de l'église d'York, jouissant alors d'une grande réputation, en raison de ses connaissances variées dans les lettres, les mathématiques et l'astronomie.

A cette époque, l'Angleterre possédait quelques hommes éclairés; parmi ceux qu'on y avait envoyés d'Italie pour la propagation de la foi, il s'en trouva plusieurs qui avaient quelques notions des sciences, qu'ils transmirent à d'autres religieux. C'est par ce moyen et par le concours des bénédictins que, depuis le VIe siècle, elles furent conservées pour arriver jusqu'à l'époque de Charlemagne.

Aidé de son maître, ce grand homme ouvrit bientôt des écoles publiques, non-seulement à Paris, mais encore dans les diverses parties de la Gaule et de la Germanie soumises à sa domination. Ces écoles étaient dirigées par des hommes venus de l'Angleterre et de

l'Irlande; pour donner plus de faveur à ces établissements, il en fonda un dans son propre palais, et l'on y enseigna toutes les parties qui constituaient alors les études. Charlemagne se livra lui-même avec ardeur à celle de la rhétorique, de la dialectique et de l'astronomie.

Sous les successeurs immédiats de Charlemagne, je veux dire sous Louis le Débonnaire et Charles le Chauve, les écoles furent à peu près fermées. Dans les siècles suivants, jusqu'aux XII[e] et XIII[e], l'Europe continua d'être plongée dans les ténèbres; les croisades absorbaient trop l'attention des esprits pour que l'on pût se livrer à l'étude.

Vers la fin du XI[e] siècle, la scolastique, mélange monstrueux de subtilités dialectiques, de théologie et de notions scientifiques, fut en grande faveur; aussi, l'art de discuter, qui conduisait à la célébrité, fut-il la passion dominante. Dans le siècle suivant, les doctrines d'Aristote furent très-répandues en Occident. Frédéric II, qui régnait en Allemagne, y contribua beaucoup; mais, d'un autre côté, il rendit un service éminent, en faisant traduire les livres arabes qui traitaient de mathématiques, de physique et de médecine. L'enthousiasme pour Aristote fut porté à un tel degré, que l'on ne s'occupait pas de rechercher ce qui était vrai ou non dans ces ouvrages, mais bien ce qu'avait dit le maître.

Depuis les Arabes, on ne voit, dans tous les ouvrages de physique, aucune expérience nouvelle; il faut aller jusqu'au XIII[e] siecle pour trouver un homme qui se soit occupé de la physique, sous le rapport expérimental; cet homme, considéré encore par le peuple comme le magicien par excellence, est Albert, né à Lawingen en Souabe, vers 1205. Religieux de l'ordre de Saint-Dominique, il se livra de bonne heure à l'enseignement à Cologne, où il eut de nombreux élèves. Dans un voyage qu'il fit à Paris, le nombre de ses auditeurs fut si considérable, qu'il fut obligé de donner ses leçons sur une place qui reçut alors le nom de *Maître-Albert*, et appelée aujourd'hui *place Maubert*. Les ouvrages qu'il nous a laissés ne renferment aucun des contes absurdes que l'on a publiés sous son nom; on y voit seulement qu'il était partisan de la doctrine d'Aristote, dont il a fait de nombreux commentaires. Il avait une grande aptitude pour les sciences mécaniques, et s'occupait de l'étude des phénomènes naturels. On trouve dans ses ouvrages une dissertation sur les aérolithes, sur l'existence desquels il n'élève aucun doute, et qu'il cherche à expliquer, soit en les considérant comme formés dans les hautes régions de l'atmosphère, ou bien comme étant tombés de la lune, hy-

pothèses qui ont été renouvelées de nos jours, et auxquelles on en a ajouté une autre, celle de corps errants dans l'espace, et qui tombent sur la terre dès l'instant qu'ils se trouvent dans sa sphère d'activité. Il paraît qu'il cultivait dans des serres chaudes des plantes qui fleurissaient et des arbres qui donnaient des fruits avant la saison, ce qui le mit à même de donner en hiver, à un évêque, ce fameux festin au milieu d'un jardin fleuri. Ce repas fit événement, et ne contribua pas peu à le faire accuser de magie. Au surplus, la variété des connaissances d'Albert l'élevait si fort au-dessus de ses contemporains, qu'on s'explique facilement tout ce qu'il y a d'absurde dans ce qu'on a débité sur son compte.

Dans le XIII[e] siècle parut encore Roger Bacon, cordelier, professeur à Oxford, élève d'Albert surnommé le Grand, et appelé lui-même le *docteur admirable*. Il conçut l'idée de fonder les sciences physiques sur l'observation, et d'interroger la nature au moyen de l'expérience. Essayer de secouer le joug de l'autorité scolastique, était une innovation sans exemple; aussi produisit-elle un grand scandale. Il parvint néanmoins à faire des élèves qui réunirent une somme considérable pour le temps, afin de subvenir aux frais des expériences. Une entreprise aussi hardie devait attirer sur lui des persécutions dans un siècle d'ignorance. Il fut condamné par le général des cordeliers à une prison perpétuelle, au pain et à l'eau, pour avoir essayé de dissiper les préjugés dont son siècle était imbu; il en sortit après s'être justifié, mais à la condition de ne plus s'occuper de physique.

On lui doit des notions sur les propriétés des verres concaves et convexes, dont il parle dans son *Opus majus*, en disant que « les « Pères, quand ils seront âgés, pourront se servir de ces verres pour « lire. » Il y fait mention également de combinaisons de verres, à l'aide desquelles on pourrait grossir les objets et voir à des distances immenses, qu'il s'exagère; de la possibilité de faire mouvoir des chariots et des vaisseaux à l'aide d'un mécanisme intérieur auquel on pourrait appliquer la force du vent : prévision de l'emploi de la vapeur.

Dans son *Speculum alchimiæ*, il parle des propriétés de la poudre à canon, dont l'usage était déjà vulgaire de son temps, puisque les enfants s'amusaient à en enfermer dans du parchemin, pour y mettre ensuite le feu. Bacon, que son génie élevait au-dessus de son siècle, a avancé qu'en employant la composition de salpêtre, de soufre et de charbon, on pourrait renverser des villes. Bien que cet homme supérieur ait partagé toutes les erreurs des alchimistes, er-

reurs bien pardonnables dans les temps de ténèbres où il vivait, on ne lui en doit pas moins une grande reconnaissance pour avoir été un des fondateurs de la physique expérimentale. Quoique Roger Bacon ait donné à cette science une grande impulsion, néanmoins il n'a pas peu contribué à répandre, comme son maître, la doctrine d'Aristote, tout en cultivant les mathématiques, la mécanique, l'astronomie, l'optique et la chimie.

Les événements qui troublèrent l'Europe dans le XIVe siècle arrêtèrent l'impulsion que Roger Bacon venait de donner aux sciences; il peut se faire aussi qu'il ait eu des idées trop avancées pour être compris de ses contemporains.

Aussi faut-il aller jusqu'au XVe siècle pour voir reprendre aux sciences une marche régulière et progressive. Je passe sous silence tout ce qui n'a pas rapport à l'avancement des sciences expérimentales, pour arriver à Paracelse, né en 1496, et auquel on doit des préparations chimiques qui produisirent quelquefois des effets si heureux, que les médecins commencèrent à croire que la science à laquelle il s'était voué, pouvait leur fournir d'excellents moyens de soulager l'humanité souffrante. C'est à cette époque que la chimie reçut elle-même une grande impulsion. Médecins, chimistes, métallurgistes, naturalistes et industriels se mirent à l'œuvre, chacun dans l'étendue de sa sphère. Les découvertes se succédèrent rapidement, et la métallurgie abandonna les méthodes routinières pour en suivre d'autres fondées sur des découvertes récentes.

Paracelse occupa à Bâle, en 1527, la première chaire de chimie; de cette époque date une ère nouvelle pour cette science, dont nous ne suivrons pas tous les progrès; nous dirons seulement qu'Agricola, après avoir étudié la minéralogie dans les mines de Bohême et de Schemnitz, aida aussi à jeter les bases de la chimie rationnelle. Déjà, depuis deux siècles, on s'en occupait en Allemagne, et avec ardeur, à cause de l'exploitation des mines qui a toujours été productive dans cette contrée.

L'alchimie fit alors de grands progrès; les préparations mercurielles, sulfureuses ou antimoniales qui venaient d'être découvertes et qui étaient des remèdes héroïques pour certaines maladies que les anciennes doctrines n'attaquaient jamais avec succès, contribuèrent à lui donner une vogue prodigieuse. Ses adeptes avancèrent de nouveau et avec plus de force qu'il devait exister un principe unique, au moyen duquel on devait élaborer l'or et chasser les principes morbides. La lutte devint vive entre les chimistes et les partisans

de la pierre philosophale, dont la secte s'évanouit entièrement dans le XVIIIe siècle.

L'électricité et le magnétisme, dont il n'a point été fait mention jusqu'ici, ne constituaient pas encore une des parties les plus importantes de la physique générale. Gilbert est le premier qui ait publié, en 1590, un ouvrage rempli d'idées neuves sur quelques-uns des phénomènes qui en dépendent. C'est lui qui a commencé à classer les corps d'après leurs propriétés électriques de frottement.

Nous voilà aux XVe et XVIe siècles, à cette époque peut-être unique dans les fastes du monde, où les esprits s'agitaient de toutes parts pour étendre la sphère de leurs connaissances, et chasser les erreurs qui, accumulées depuis des siècles dans nos annales, retardaient les progrès de la civilisation. En effet, comme l'a dit M. Herschel (*Preliminary discourse on the study of natural philosophy*, London, 1833), Vasco de Gama doublait le cap de Bonne-Espérance; Colomb découvrait l'Amérique; Magellan cherchait les terres australes; Drake faisait le tour du monde; l'astronomie se débarrassait des chaînes que lui avaient imposées les doctrines d'Aristote; Copernic, en faisant revivre le système de Pythagore, annonçait que la terre tourne; Tycho-Brahé étudiait le cours des planètes et celui des comètes; Képler découvrait les trois grandes lois qui régissent les mouvements des corps célestes; Galilée explorait les cieux avec son télescope, découvrait la pesanteur et jetait les bases de la physique expérimentale; Toricelli trouvait la pression de l'atmosphère; François Bacon, enfin, énumérait les connaissances humaines, et traçait aux générations futures la route qu'elles devaient suivre pour arriver à des vérités nouvelles.

Voilà des découvertes dont l'esprit humain pouvait s'enorgueillir. Honneur donc à ces intrépides philosophes qui n'ont pas craint de braver les mers, de risquer leur liberté et même leur vie, pour établir le règne de la vérité sur des bases inébranlables!

CHAPITRE III.

Du progrès de la physique générale depuis le XVIe siècle jusqu'à Newton.

Avant l'époque à laquelle nous sommes arrivés, et bien qu'on discutât sur Platon, Aristote, Pythagore, Zoroastre, et que l'esprit de système dominât toujours, néanmoins, des observations, des expériences, qui avaient pour but d'expliquer les phénomènes naturels, et particulièrement les phénomènes célestes, commencèrent à montrer les erreurs des anciens. On comprit alors que, pour connaître la nature, il fallait l'étudier sous tous les points de vue : mais que de temps, que de soins, que de peines, pour arriver à cette grande vérité, sans laquelle il était impossible de faire avancer les sciences physiques!

En France, le péripatétisme était toujours en honneur; il eut pour adversaire Gassendi, né vers la fin du XVIe siècle. La doctrine qu'il voulut combattre était si profondément enracinée dans les esprits, qu'il fut obligé, pour la détruire, de prendre des détours. C'est ainsi qu'en parlant d'Aristote, ou du moins de ses maximes, il présentait les objections qu'on pouvait y faire, sous la forme de doutes, de paradoxes, qu'il soumettait au jugement de l'Église. Telle fut la marche qu'il suivit au collége de France, où il fut professeur de philosophie. Il est à regretter qu'un esprit aussi juste ne se soit pas livré aux expériences, comme il aurait dû le faire s'il eût suivi l'impulsion donnée au siècle dans lequel il vivait par les hommes illustres dont je vais parler. Toutefois, il rendit un service dont on doit lui savoir gré, c'est d'avoir montré que l'on avait jusqu'ici fait fausse route, et qu'au lieu de commencer par rechercher les causes pour arriver aux effets, il valait mieux suivre une route inverse, à l'exemple de Copernic, de Galilée, de Képler, de ces philosophes qui ont influé si puissamment sur la marche des sciences, et par suite sur l'avenir du monde.

Copernic, né à Thorn, en Prusse, en 1473, fut frappé, en étudiant les auteurs anciens, particulièrement Cicéron et Plutarque, de l'hypothèse des pythagoriciens, qui soutenaient que la terre n'était pas au centre du monde. Il partit de là pour établir son système du monde; mais il mourut avant d'avoir été témoin du scandale que devait pro-

duire son ouvrage. En 1515, l'inquisition condamna le système de Copernic, comme faux et absurde en philosophie, et hérétique. Voilà comme était accueillie l'opinion de ceux qui osaient avancer que le soleil était placé au centre du monde, et que la terre tournait autour de cet astre, en effectuant sa révolution dans le cours d'une année.

Copernic prépara les voies à Galilée, qui démontra par des expériences incontestables que le système combattu était le véritable, le seul admissible. A dix-huit ans, ce grand homme, né à Pise en 1564, fit la première et une de ses plus importantes découvertes : étant un jour dans l'église de Pise, il aperçut le mouvement périodique et réglé d'une lampe suspendue à la voûte. Il en conclut aussitôt l'isochronisme des oscillations du pendule, dont il fit une application à la construction d'une horloge astronomique, qui fut ensuite perfectionnée par Huyghens. En etudiant l'hydrostatique, Galilée, frappé du principe découvert par Archimède pour trouver la densité des corps, imagina la balance hydrostatique. En cherchant la cause de la pesanteur sur tous les corps, il reconnut que, quelle que soit leur nature, ils sont également sollicités par la pesanteur, et que s'ils ne parcourent pas les mêmes espaces dans le même temps, cette différence tient à ce que l'air leur offre une résistance inégale. Il découvrit en même temps la théorie du mouvement uniformément accéléré en vertu duquel les corps tombent. Galilée est regardé comme l'un des inventeurs du thermomètre ; on lui doit les armures au moyen desquelles on augmente la force des aimants naturels. Sur l'indication d'un instrument destiné à voir les objets éloignés, inventé en 1608 par Jacques Métius, il en construisit un semblable : c'était un télescope, dont le grossissement était de trois fois le diamètre des objets. Voulant poursuivre ses recherches, il construisit un autre télescope qui grossissait les objets d'environ trente-trois fois leur diamètre. L'ayant aussitôt dirigé sur la lune, qui apparaissait à l'horizon, il reconnut que la ligne de séparation de la lumière et de l'ombre etait terminée irrégulièrement, et qu'il existait des points éclairés dans les ombres ; il en conclut de suite que la surface de la lune était, comme la surface de la terre, couverte d'aspérités. Il montra plus tard que ces inégalités étaient des montagnes plus élevées que celles de la terre. Il éprouva aussi le premier le plaisir de voir Vénus avec ses phases, Jupiter, entouré de ses satellites, qu'il appela astres de Médicis. Ainsi fut confirmée par l'observation la prévision de Copernic, qui avait annoncé que Vénus avait des phases comme la lune. Galilée reconnut encore les nébuleuses, et une foule d'étoiles que l'on ne pouvait distinguer à la vue simple. Quel-

ques jours lui suffirent pour faire tant de découvertes, qui remplirent son âme d'admiration pour les phénomènes naturels, et portèrent au comble son enthousiasme pour les sciences. C'est encore Galilée qui, le premier, observa les taches du soleil, qui reconnut que la lune nous présente toujours à peu près la même face, et qu'elle est soumise à une espèce d'oscillation appelée *libration*, dont les lois ont été trouvées par Dominique Cassini.

Les taches du soleil et les inégalités de la lune établissaient la ressemblance des corps célestes avec la terre; les satellites de Jupiter indiquaient comment la lune accompagne notre planète; les phases de Vénus démontraient la révolution périodique de cette planète. On devait en inférer, par analogie, que la terre n'était pas immobile au centre du monde, et qu'elle devait avoir un mouvement de rotation. Le sénat de Venise récompensa noblement le professeur de Padoue des immenses services qu'il venait de rendre aux sciences.

Tant de découvertes importantes, dans un siècle encore peu éclairé, et qui portaient atteinte aux croyances religieuses sur plusieurs articles de foi, attirèrent sur leur auteur les persécutions du clergé, qui prétendait que les découvertes de Galilée dans les astres n'étaient que de pures visions. Il fut donc mandé en cour de Rome, pour s'y défendre d'avoir soutenu le système de Copernic. On voulut lui faire reconnaître publiquement les propositions suivantes : « Soutenir que le soleil « est immobile au centre du monde, est une opinion absurde, fausse « en philosophie, et formellement hérétique; soutenir que la terre n'est « pas placée au centre du monde, qu'elle n'est pas immobile, et qu'elle « a un mouvement journalier de rotation, est également une proposi- « tion absurde, fausse en philosophie, et au moins erronée dans « la foi. »

En vain Galilée employa-t-il tous les arguments que la raison pouvait lui suggérer pour combattre de telles absurdités, irritée de sa résistance, la cour de Rome lui fit défense de professer désormais l'opinion qu'elle venait de condamner, après avoir obtenu néanmoins de lui, par violence, une abjuration qu'il maudissait. A ce prix, il recouvra sa liberté. Il continua toujours ses recherches en physique. Des fontainiers lui ayant rapporté que l'eau ne s'élevait pas dans les pompes au delà de trente-deux pieds, il répondit que la nature n'avait horreur du vide que jusqu'à cette hauteur, et que la colonne d'eau en était la mesure. L'horreur du vide était encore un de ces anciens préjugés dont il était difficile de se débarrasser. Galilée croyait bien à la pesanteur de l'air; mais il laissa la découverte, et l'honneur qui

en résultait, à Toricelli, son élève, auquel on doit le baromètre.

Vers 1632, seize ans après sa condamnation par la cour de Rome, Galilée, désirant adoucir ses juges, publia des dialogues dans lesquels il feignait de prouver que les docteurs qui combattaient le système de Copernic n'étaient pas sans instruction. Mais l'interlocuteur qui soutenait l'immobilité de la terre n'ayant pas raison dans la discussion, il fut cité de nouveau au tribunal de l'inquisition, malgré le mauvais état de sa santé. Obligé de se rendre à Rome, en 1633, à l'âge de soixante-neuf ans, on le contraignit à renier des principes fondés sur l'évidence, et de faire l'abjuration suivante : « J'abjure, je maudis et « je déteste l'erreur du mouvement de la terre. » Il fut condamné ensuite, en raison de la récidive, à une prison perpétuelle ; mais, par grâce spéciale, au bout d'un an on lui donna le territoire de Florence pour prison, en l'obligeant à réciter pendant trois ans, une fois par semaine, les sept psaumes de la pénitence.

Accablé d'années, d'infortunes et d'infirmités, Galilée ne se laissa cependant point abattre. Il continua ses travaux ; et, à l'âge de soixante-quatorze ans, il achevait ses tables des satellites de Jupiter. Ce grand génie s'éteignit enfin après avoir élevé aux sciences un monument éternel, auquel son nom est à jamais attaché, et qui le range au nombre des premiers fondateurs de la philosophie naturelle.

A la même époque vivait Képler, né en 1571. Il possédait à un haut degré les qualités qui distinguent un grand observateur. Il voulait tout calculer, tout examiner, et assigner des causes physiques aux phénomènes naturels. La patience était l'une de ses qualités dominantes, comme de tous ceux qui se livrent avec ardeur à l'étude des sciences. Il travailla en effet pendant trois ans à établir cette fameuse loi : que les carrés des temps des révolutions des planètes autour du soleil, sont comme les cubes des distances. Il employa également beaucoup de temps à établir sa seconde loi, dont voici l'énoncé : « Les orbites planétaires sont des ellipses dont le soleil occupe l'un des foyers. » Ce n'est que plus tard qu'il trouva que les planètes se meuvent dans des courbes planes, et que leurs rayons vecteurs décrivent autour du soleil des aires proportionnelles au temps.

Telles sont ces trois grandes lois, dont on n'a bien apprécié toute l'importance que depuis l'époque où Newton montra l'usage que l'on pouvait en faire pour déterminer la force qui retient chaque planète dans son orbite.

Képler annonça, dans un de ses ouvrages, que l'intensité de la lumière décroît en raison inverse du carré de la distance, loi qui est

précisément celle de l'attraction du soleil sur les planètes, et dont la découverte est due à Newton. Il a conclu néanmoins de ses recherches, sans le prouver par le calcul, que la pesanteur est la loi universelle de la nature, et il a également avancé, sans le démontrer, que l'air était pesant. Dans ses ouvrages, Képler a parlé du microscope. Dans sa *Dioptrique*, publiée en 1611, il est question de la combinaison de deux lentilles convexes qui renversent les objets. Quoiqu'il n'ait pas exécuté cette combinaison, on le considère néanmoins comme le premier qui ait émis l'idée d'après laquelle on construit aujourd'hui la lunette astronomique. Muni d'une lunette différente de celle de Galilée, il reconnut que les montagnes de la lune doivent être réellement plus grandes que celles de la terre.

Les découvertes dont je viens de parler, ainsi que les conséquences que Képler en a déduites, sans cependant s'assurer de leur exactitude par l'observation, suffisent pour montrer l'immense influence qu'elles ont dû exercer sur l'astronomie et sur la physique générale.

Les grandes vérités que Galilée et Képler venaient de mettre au jour, au milieu de difficultés sans nombre, sapaient à coups redoublés, jusque dans leur fondement, la doctrine d'Aristote. Il s'agissait alors de lui en substituer une autre fondée sur les faits, et appropriée aux besoins de la science à cette époque. Cette grande tâche fut remplie par François Bacon, né en 1560. Ce grand philosophe fut entraîné par le mouvement général, qui portait tous les esprits à la recherche de la vérité à l'aide de l'expérience. Il a fait peu de découvertes en physique; ses expériences n'ont pas un grand intérêt; mais, en revanche, il a rendu d'immenses services aux sciences, en traçant la marche à suivre pour arriver à la vérité par l'induction. Ses vues spéculatives firent sentir, plus qu'on ne l'avait fait jusqu'alors, la nécessité de rechercher les faits pour fonder la nouvelle philosophie sur des bases que les siècles futurs devaient respecter. C'est ainsi que des faits qui avaient été jugés jadis comme de peu d'importance, furent étudiés, classés, et conduisirent à des principes et à des lois. Voici quelques-unes des règles de Bacon que le physicien ne doit jamais perdre de vue : « Les faits particuliers doivent précéder les faits généraux dans « les recherches philosophiques, les vérités générales étant tardives de « leur nature. Un fait observé et décrit devient à l'instant un élément « de la science. Un recueil de faits bien observés et classés avec ordre « peut conduire à découvrir les lois et les causes. Quand les faits n'é- « taient pas réunis en corps de science, la science n'existait pas, at- « tendu qu'elle se compose, non-seulement de la connaissance des faits,

« mais encore de leur rapport mutuel, et des lois qui lient ces faits en-« tre eux. » Voilà le code de la science que nous a légué Bacon, et dont on ne saurait s'écarter sans crainte de s'égarer. L'amour de l'étude et de la philosophie fut porté chez lui à un si haut degré, que, bien qu'il fût chancelier d'Angleterre, il laissa à peine de quoi subvenir à ses funérailles.

Nous arrivons à Descartes, à ce génie puissant qui renversa de fond en comble la philosophie d'Aristote, pour lui en substituer une autre qui éprouva le même sort, mais avec cette différence que Descartes, malgré ses erreurs, n'en est pas moins un des fondateurs de la physique.

Descartes naquit en 1596; il imagina, à l'âge de vingt ans, l'application de l'algèbre à la géométrie, un des puissants auxiliaires de la physique. C'est à l'aide de cette science nouvelle qu'il traduisit les lignes, les surfaces, et même les solides en langue algébrique; il s'en servit pour déterminer, par le calcul, l'équilibre des forces, la résistance des poids, l'action du frottement, le rapport des vitesses et des masses; on doit donc le regarder comme le fondateur de la mécanique analytique. Sous ce rapport, la découverte de l'application de l'algèbre à la géométrie a préparé les voies à Newton et aux Bernoulli.

Constamment guidé par l'esprit d'analyse, et tourmenté du besoin de tout expliquer, Descartes conçut l'idée de réunir toutes les sciences et d'établir entre elles une dépendance mutuelle. C'est lui qui, en rejetant le vide, admit le premier l'existence d'un fluide très-délié répandu dans l'univers et pénétrant tous les corps; il supposa en même temps que l'espace était infini, attendu, disait-il, que l'esprit ne pouvait saisir ces nouvelles limites. Il admit aussi une matière primitive, unique, élémentaire, source et principe de tous les êtres, divisible à l'infini, se modifiant par les mouvements, se décomposant, et pouvant même s'organiser. C'est avec cette matière primitive qu'il essaya d'expliquer la formation de l'univers. Suivant lui, il existe trois éléments, formés de millions de molécules entassées les unes à côté des autres, qui se heurtent, se froissent, se brisent, et sont emportées, d'un mouvement rapide, comme des tourbillons autour de différents centres, d'où elles tendent à s'éloigner, en vertu d'une force centrifuge qui naît du mouvement circulaire. Ce système, à l'aide duquel il voulut expliquer tous les phénomènes naturels, prêtait tellement à l'illusion, puisqu'il ne fallait que quelques instants pour le rendre accessible à tous les esprits, qu'il eut le plus grand succès. Il fut

généralement adopté, puis commenté par les philosophes qui voulaient renverser les doctrines d'Aristote.

Les écoles se soulevèrent contre une telle innovation, et se montrèrent indignées de ce que l'on osât porter une main sacrilége sur le chef des péripatéticiens. Quoique ces conceptions ne supportent pas aujourd'hui la discussion et soient abandonnées, elles durent avoir faveur à une époque où il s'agissait de renverser la doctrine d'Aristote et de lui en substituer une autre. Descartes avait eu la grande pensée de réunir toutes les observations faites avant lui pour établir un système du monde; il ne s'était pas élevé seulement jusqu'aux cieux pour en étudier le mécanisme et l'expliquer, il avait porté également ses regards investigateurs sur la terre. En essayant d'appliquer ses tourbillons à l'explication des phénomènes naturels, il passa successivement en revue la pesanteur, les marées; il admit l'existence d'un feu central, et essaya de montrer comment la vertu magnétique se développe, et de quelle manière le fluide électrique circule dans les corps.

Galilée avait découvert la pesanteur; Toricelli la pression de l'atmosphère; Descartes donna l'idée à Pascal de cette fameuse expérience avec le baromètre sur le Puy de Dôme, pour montrer que la pression diminue à mesure que l'on s'éloigne de la surface de la terre. Ce grand physicien a expliqué l'arc-en-ciel, et si son explication n'est pas complète, cela tient à ce qu'il ignorait la composition de la lumière. Ses principaux travaux roulent particulièrement sur la lumière, dont il a expliqué les propriétés générales dans sa *Dioptrique*; il la suit dans sa route à travers les corps; il la voit, dans un milieu uniforme, se mouvoir en ligne droite, se réfléchir sur la surface des corps solides, en faisant un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence; il la voit, enfin, quand elle traverse les différents milieux, se déranger de son cours, et se briser d'après des lois dont l'exactitude est parfaitement démontrée par l'expérience, et dont voici l'énoncé : « Le « rayon réfracté et le rayon incident sont dans un plan perpendicu- « laire à la surface; le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'an- « gle de réfraction sont dans un rapport constant pour la même subs- « tance réfringente, quelle que soit l'incidence. »

Descartes a analysé les phénomènes de la vue, et tout ce qui tient à l'organisation de l'œil; il a expliqué comment les rayons de lumière, émanés des objets extérieurs, viennent peindre l'image de ces objets sur la rétine; pourquoi l'image étant renversée est vue droite, et pourquoi l'image qui est double est toujours vue simple. Avant lui,

on avait découvert les verres concaves et convexes. Métius, artisan hollandais, avait fait le premier télescope dont Galilée avait expliqué le mécanisme, en construisant lui-même l'instrument sur une simple indication ; Descartes s'empara de toutes ces découvertes ; il en donna la théorie mathématique, ajouta une infinité de vues nouvelles sur la lumière, et guida l'opticien dans l'art de travailler le verre. On peut donc dire qu'il jeta les bases de la dioptrique, qui est un de ses beaux titres de gloire. Ce fut lui enfin qui, ayant appris à secouer l'autorité d'Aristote, donna l'impulsion à la nouvelle philosophie.

De toutes parts on se mit à l'œuvre pour étudier la nature, et certes les efforts n'ont pas été vains; ceux qui essayèrent de faire prévaloir les idées philosophiques de Descartes sur celles d'Aristote furent persécutés, jusqu'à ce qu'enfin elles régnassent seules dans la science. La philosophie d'Aristote a rendu un grand service en annonçant que l'on ne peut arriver à la connaissance des choses qu'à l'aide de l'expérience; mais ce grand philosophe ne s'en tint pas toujours malheureusement à ce principe. Pour bien juger des immenses progrès que fit la philosophie naturelle depuis l'impulsion donnée par Descartes, il faut passer en revue les travaux de Huyghens et de Newton.

Huyghens, né en 1629, à la Haye, montra, dès l'âge de treize ans, les plus heureuses dispositions pour la mécanique; vers 1655, il s'occupa, avec son frère aîné, de l'art de tailler et de polir les verres des grandes lunettes. A l'aide d'un objectif de douze pieds de foyer, qu'il construisit lui-même, il découvrit un des satellites de Saturne. Galilée, qui avait trouvé l'isochronisme des petites oscillations du pendule, était mort avant d'en avoir fait l'application aux horloges; Huyghens, en 1657, fit connaître cette heureuse application, qui fait époque dans l'histoire de l'astronomie et de la physique.

Avant cette découverte, et depuis celle de Galilée, une personne comptait exactement les oscillations d'un poids suspendu à une corde à laquelle on imprimait un mouvement d'impulsion. Huyghens suppléa à cette manœuvre pénible, en imaginant l'échappement qui est susceptible d'une perfection presque indéfinie, et ne tarda pas à appliquer ses horloges à la détermination des longitudes. On lui doit encore cette observation curieuse, que deux pendules situés à peu de distance l'un de l'autre s'influencent de telle manière que leurs oscillations sont ramenées à une uniformité rigoureuse et durable, lors même que l'on a troublé leur coïncidence.

Huyghens étant parvenu à construire un objectif de vingt-deux pieds de foyer, étudia tout le système de Saturne. Galilée, à la vé-

rité, avait déjà remarqué les aspects singuliers que présente cette planette; mais la lunette dont il se servait n'avait pas un assez fort grossissément pour en découvrir la véritable cause. Huyghens reconnut que ces différents aspects étaient dus à un anneau très-mince qui entourait la planète, et dont les positions diverses, par rapport à la terre, en altéraient la forme apparente au point de la faire disparaître. On doit à Huyghens des expériences intéressantes sur la forte adhérence que conservent dans le vide deux lames de métal polies, bien planes et qui ont été frottées quelque temps l'une contre l'autre. Il soupçonna dès lors que cette adhérence était due à des forces qui agissent à de petites distances et qui produisent la cohésion. C'est lui qui le premier eut l'idée, comme on le voit dans une lettre qu'il écrivit à Williams Jones, de la possibilité de trouver la hauteur d'une station, au moyen de la pression de l'air en ce lieu.

Huyghens a doté encore la société des montres ordinaires; avant lui, outre qu'elles étaient d'un grand prix, elles n'étaient susceptibles ni de simplicité ni de régularité. Il adapta à ces montres grossières le ressort spiral pour régler les oscillations du pendule.

En 1690, il publia son *Traité de la lumière,* dans lequel se trouve la théorie mathématique de la double réfraction du cristal de roche. On lui doit aussi de belles recherches sur l'aplatissement de la figure de la terre; pour le déterminer, il partit du raccourcissement du pendule observé par Richer près de l'équateur, et en conclut que la pesanteur y était diminuée par l'action de la force centrifuge; il découvrit ensuite que la combinaison de cette force, qui varie en raison de la latitude et de la sphéricité de la terre, ne devait pas laisser aux corps graves une tendance perpendiculaire à la surface du globe. Après avoir reconnu que la terre était aplatie vers ses pôles, il calcula la longueur des deux axes, qu'il trouva être dans le rapport de 577 à 578, rapport trop faible de près de moitié; et cela, parce qu'il n'avait pas adopté comme Newton la loi de la gravitation.

Comme Descartes, Huyghens admettait que l'espace, ainsi que tous les corps, était rempli d'un fluide subtil et impondérable, ou matière éthérée. Suivant lui, les corps qui paraissent lumineux doivent cette propriété à ce que leurs particules étant mises dans un mouvement de vibration très-rapide, transmettent ce mouvement à la matière éthérée, et y produisent des ondes analogues à celles des ondes sonores, avec cette différence que leur propagation est plus rapide à cause de la plus grande élasticité du milieu : ces ondes, en frappant la rétine, produisent la sensation de la lumière.

On voit que Huyghens, pour expliquer les phénomènes de la nature, imagina, comme Descartes, des combinaisons artificielles, au lieu de déduire par les mathématiques, comme Newton le fit, les forces qui agissent, en s'appuyant sur les faits connus. C'est ainsi qu'il voulut expliquer la pesanteur, en admettant la pression d'une matière subtile, répandue autour de la terre dans une sphère d'une étendue limitée, et qui, étant douée d'un mouvement circulaire très-rapide, et, par suite, d'une force centrifuge très-grande, tend à pousser les corps vers le centre de la terre. Huyghens, comme on le voit, peut être considéré, à juste titre, avec Descartes et Galilée, comme un des fondateurs de la physique; mais à Newton appartient la gloire d'avoir coordonné tous les faits trouvés avant lui, en découvrant et mesurant la force productrice, et enrichissant lui-même la physique d'admirables découvertes.

Ce grand homme naquit en 1642, l'année même de la mort de Galilée. Descartes régnait à cette époque dans la philosophie, soit spéculative, soit naturelle. L'autorité de ses systèmes de métaphysique avait succédé à l'empire qu'exerçaient, auparavant, ceux d'Aristote. En partant des lois de Képler, et à l'aide du calcul des fluxions qu'il créa pour expliquer le système du monde, Newton trouva que l'attraction solaire, comme l'attraction terrestre, décroît en raison inverse du carré de la distance. Aussitôt après la découverte de cette loi, Newton l'appliqua à la lune, c'est-à-dire, à la vitesse de ses mouvements de rotation autour de la terre, d'après sa distance déterminée astronomiquement, puis à la force d'attraction de la terre sur les corps qui tombent à sa surface. Une de ses grandes découvertes est la composition de la lumière; en étudiant sa réfraction à travers des prismes, ce grand homme trouva que la lumière, telle qu'elle émane des corps rayonnants, n'est pas une substance simple et homogène, comme on le pensait; mais qu'elle est composée d'une infinité de rayons doués de refrangibilités inégales. Le calcul des fluxions, qui a de si grands rapports avec le calcul différentiel dont la découverte est due à Leibnitz, la théorie de la pesanteur universelle et la décomposition de la lumière, sont les grandes découvertes qui immortalisèrent Newton; il n'avait que vingt-quatre ans quand il les fit. Toutes les parties de la physique furent successivement l'objet de ses investigations, et il apposa à chacune d'elles le sceau de son génie.

Quiconque examine toutes les particularités de la vie de Newton, reconnaît facilement les difficultés qu'il dut rencontrer pour faire prévaloir ses nouvelles idées sur la lumière. Fatigué des objections qu'on

ne cessait de lui adresser, il écrivit à Leibnitz qu'il était résolu de ne pas s'exposer davantage en public, s'accusant d'imprudence d'avoir, pour une vaine ombre, perdu son repos. Il s'occupa des intermittences de réflexion et de réfraction qui s'opèrent dans les lames minces, et peut-être, suivant lui, dans les dernières particules des corps.

En cherchant à expliquer les phénomènes de coloration qui s'observent dans les plaques épaisses de tous les corps, lorsqu'elles sont convenablement présentées à la lumière incidente, Newton ramena ces phénomènes à se déduire des mêmes lois que les phénomènes des lames minces; puis il réunit le tout en une propriété unique qui peut s'exprimer ainsi : chaque particule de lumière, depuis l'instant où elle quitte le corps d'où elle émane, éprouve périodiquement, et à des intervalles égaux, une continuelle alternative de dispositions à se réfléchir ou à se transmettre à travers les surfaces des corps diaphanes qu'elle rencontre. Tel est l'énoncé du principe des accès de facile réflexion et de facile transmission, que l'on trouve dans son *Optique*, publié en 1704. Dans un autre travail publié en 1675, il chercha à lier ces propriétés à une hypothèse relative à l'existence d'une matière éthérée, afin de pouvoir en déduire la nature de la lumière, celle de la chaleur, et l'explication de tous les phénomènes de combinaison ou de mouvement qui semblent produits par des principes intangibles et impondérables.

Suivant Newton, et comme l'avait dit avant lui Descartes, il existe dans la nature un fluide imperceptible à nos sens, très-élastique, qui s'étend dans tout l'univers, et pénètre les corps avec des degrés de densité divers, et qu'on appelle éther. Ce corps étant très-élastique, il en résulte que par l'effort qu'il fait pour s'étendre, il se refoule lui-même, et presse les parties matérielles des autres corps avec une énergie plus ou moins puissante, selon sa densité actuelle, ce qui fait que tous ces corps doivent tendre continuellement les uns vers les autres. L'éther venant à être ébranlé en un de ses points, il en résultait un mouvement vibratoire, lequel est transmis dans le milieu éclairé par des ondulations, comme l'air transmet le son, mais plus rapidement, en raison de son extrême élasticité. Ces ondulations sont aptes ensuite à ébranler les particules matérielles elles-mêmes. Newton n'admit pas, comme Descartes, que la lumière résultât de l'impression produite par les ondulations de l'éther sur la rétine; mais il supposa la lumière une substance d'une nature propre, différente de l'éther, et composée de parties hétérogènes, qui, partant des corps lumineux dans tous les sens, avec une vitesse excessive que l'on peut mesurer

cependant, ébranlent l'éther dans leur passage, y produisent des ondulations par la rencontre desquelles elles peuvent être à leur tour retardées ou accélérées.

Dans la dix-septième question annexée à son *Optique*, Newton se demande si l'éther ne produirait pas également la gravitation universelle, ainsi que les phénomènes physiologiques. Toutes les questions relatives à la gravitation furent exposées dans le *Traité des principes*, ouvrage tellement abstrait pour l'époque, qu'il n'y eut que trois ou quatre personnes en état de le comprendre. Huyghens n'admit qu'une partie de ses principes, qui furent combattus longtemps après par Jean Bernoulli. Enfin, le grand principe de la gravitation universelle ne fut définitivement admis par les savants que cinquante ans après que Newton l'eut annoncé au monde.

Newton sentait parfaitement que la chimie devait être une annexe de la physique; aussi s'y livra-t-il avec une ardeur toute particulière, comme on le voit dans ses recherches sur les alliages des métaux, recherches entreprises dans le but de découvrir les combinaisons les plus avantageuses à l'optique. Il fut conduit par là à un grand nombre de particularités remarquables sur la constitution des corps. Dans son travail sur les lames minces, on trouve des essais très-variés sur les combinaisons que les substances solides ou liquides produisent dans leur réaction les unes sur les autres, et sur la tendance et la répugnance qu'elles semblent avoir à s'unir. Il étudiait donc la chimie sous le rapport des forces qui régissent les actions à petite distance. En parlant de ces forces, et après avoir découvert l'existence de l'attraction moléculaire, il dit positivement que des forces semblables à celles qui produisent cette attraction, mais variant seulement dans la loi de décroissement et d'intensité, devaient présider à la combinaison des parties élémentaires des corps. Tous les matériaux qu'il avait réunis à cet égard, pour lier l'attraction moléculaire aux affinités, furent détruits par un accident que les sciences déploreront à jamais. Les papiers dans lesquels se trouvaient consignés ces résultats furent brûlés, dit-on, par une bougie qu'un chien qu'il affectionnait, et qui était monté sur son bureau, renversa pendant qu'il était dans une chambre voisine. Cet événement l'affligea au point d'altérer pendant quelque temps sa santé et même sa raison.

On doit également le considérer comme ayant posé le premier les bases de la chimie mécanique, en montrant que les combinaisons dépendent de l'action moléculaire, en même temps qu'il avançait des idées neuves sur la composition et les changements d'état des corps.

Newton a donc donné une grande impulsion à la physique générale, ainsi qu'aux applications du calcul aux phénomènes naturels. Ses contemporains, et les philosophes qui vinrent ensuite, durent suivre la route que ce grand homme avait tracée.

De Newton date l'étude des forces auxquelles on doit rapporter tous les phénomènes. Ce grand philosophe n'observait les faits ou ne les classait que pour arriver aux forces. Non-seulement il s'est occupé de l'attraction des masses à de grandes distances, mais encore de celle qui se manifeste à de petites distances entre les particules des corps. C'est donc Newton qui a jeté les bases de la philosophie naturelle.

L'impulsion fut telle, que l'on renonça peu à peu aux hypothèses et aux principes vagues qui avaient retardé pendant tant de siècles la marche de l'esprit humain; aussi les découvertes se succédèrent-elles rapidement dans toutes les branches des sciences et des arts qui en dépendent; l'optique surtout fit d'immenses progrès. Tout s'enchaîne dans les sciences; les perfectionnements de l'astronomie servirent à étendre le domaine de la géographie et de la navigation. En étudiant les lois du mouvement, on sentit la nécessité d'employer les principes de mécanique. Les mathématiques devinrent alors indispensables, et l'on fut obligé de leur donner plus de développement pour les appliquer aux nouvelles découvertes.

L'histoire des sciences dans le moyen âge est pour ainsi dire celle des hommes qui les cultivaient; car on ne voit de loin en loin que des hommes supérieurs livrés uniquement à des recherches qui les ont conduits à la découverte de faits dont eux seuls s'occupaient, tant les sciences étaient concentrées dans un cercle restreint de philosophes qui travaillaient sans le concours d'autres savants. Cet état de choses changea aussitôt que l'étude des sciences se répandit dans la société, que des savants de diverses contrées s'occupèrent de recherches relatives au même sujet, et que les académies eurent été créées. Dès lors l'histoire de la science ne fut plus exclusivement celle des hommes qui la cultivaient. D'un autre côté, les découvertes de Newton excitèrent une émulation générale dans le courant du XVIII[e] siècle; aussi l'électricité, la lumière, la chaleur, le magnétisme, l'acoustique, etc., reçurent-ils des développements extraordinaires. Aujourd'hui chacune de ces parties constitue, pour ainsi dire, une science à part, dont l'étude suffit pour remplir la vie d'un seul homme. Nous sommes amené ainsi à changer l'ordre suivi jusqu'ici; au lieu de présenter succinctement la vie scientifique des hommes qui ont le plus contribué à l'avancement de la physique générale, jusques et compris

Newton, nous allons indiquer les principaux faits découverts depuis dans chacune des branches dont elle se compose. Nous commencerons par l'électricité, qui doit occuper le premier rang, en raison de ses rapports avec la lumière, la chaleur, les affinités, le magnétisme, et de son intervention dans la plupart des phénomènes naturels; puis, nous exposerons ensuite les autres parties dans l'ordre suivant : le magnétisme, la lumière, la chaleur, la pesanteur, les phénomènes capillaires et l'acoustique. Nous parlerons donc d'abord des fluides impondérables; ensuite des parties dont nous aurons besoin pour étudier la constitution moléculaire des corps.

En présentant le précis succinct de nos connaissances principales en physique, particulièrement de celles qui nous seront nécessaires pour cet ouvrage, nous avons eu particulièrement en vue de rappeler les principes généraux de la science, afin de n'avoir plus à y revenir et d'éviter au lecteur de recourir aux traités de physique.

CHAPITRE IV.

De l'Électricité.

Jusqu'au commencement du XVIIe siècle, on ne connaissait de l'électricité que le pouvoir attractif du succin et de quelques substances qui avaient été frottées, et diverses apparences lumineuses, auxquelles on n'attribuait pas encore une origine électrique. Gilbert, médecin anglais, publia vers cette époque un ouvrage très-remarquable, ayant pour titre *de Magnete*, dans lequel il fit connaître un grand nombre de corps ayant toutes les propriétés de l'ambre, et les circonstances les plus favorables à la production du phénomène.

Vers 1670, Otto de Guerike, auquel nous devons la machine pneumatique, construisit aussi la première machine électrique, composée d'un globe de soufre traversé par un axe horizontal, auquel on imprimait d'une main un mouvement de rotation, tandis que l'autre, qui appuyait dessus, produisait par son frottement un dégagement d'électricité plus considérable qu'on ne l'avait obtenu jusque-là, accompagné d'une traînée lumineuse. Newton, en 1675, trouva que l'attraction électrique se transmettait à travers le verre; il avança, en outre, que la production de l'électricité était peut-être le résultat d'un principe éthéré mis en mouvement par la vibration des particules

des corps frottés. Peut-être Newton a-t-il entrevu la véritable cause des phénomènes électriques.

Grey, en 1727, montra que tous les corps ne jouissaient pas de la même faculté conductrice; que les uns, comme les métaux, conduisaient l'électricité à de grandes distances, tandis que d'autres, tels que le verre et les résines, ne lui livraient point passage, ou du moins ne la transmettaient qu'imparfaitement. Jusque-là les recherches sur l'électricité n'étaient relatives qu'à des phénomènes d'attraction, de répulsion, de conductibilité et de lumière; mais tout à coup cette partie de la physique reçut une grande impulsion par Dufay, qui, en 1733, après avoir montré que les corps conducteurs, étant isolés, pouvaient s'électriser également par frottement, annonça qu'il existait deux principes électriques dont la réunion formait le fluide naturel : l'un fut appelé *électricité vitrée*, l'autre, *électricité résineuse*. Il fit connaître en même temps les propriétés de chacune d'elles : les électricités de même nature se repoussant, celles de sens contraire s'attirant. La machine électrique ne tarda pas à recevoir successivement de grands perfectionnements; on substitua à la main des coussins, et des globes de verre aux cylindres de soufre. En 1744, on obtenait déjà des étincelles capables de tuer de petits animaux et d'enflammer les corps combustibles; deux ans après, Cunéus de Leyde ou Muschenbrock (on ignore au juste lequel des deux) découvrit la bouteille de Leyde, dont l'effet excita un étonnement aussi général que celui qu'avait fait naître la première étincelle tirée du corps de l'homme par Dufay. Des expériences furent faites ensuite en France et en Angleterre, mais sans succès, dans le but de déterminer la vitesse de l'électricité. Dès cette époque on commençait à être frappé de la ressemblance entre les effets de la commotion électrique et ceux du tonnerre pour tuer les animaux, désorganiser les plantes, briser les corps, enflammer la résine, l'alcool, etc.

En 1747, Franklin fit quelques expériences dans le but de démontrer cette ressemblance; il préludait ainsi aux immenses services qu'il devait rendre un jour à son pays et à l'humanité, en cultivant la science électrique avec une haute sagacité. Il ne restait plus qu'à recueillir la matière même de la foudre. Cette grande expérience fut faite presque simultanément : en France, le 10 mai 1752, par Dalibart, et en Amérique, en juin de la même année, par Franklin, à l'aide de cerfs-volants lancés dans les nuages, qui fournirent aux observateurs, par l'intermédiaire de la corde, l'électricité tant désirée.

En 1756, Romas obtint les résultats les plus étonnants à l'aide d'un cerf-volant de deux mètres trente-trois centimètres, lancé à une hauteur de cent soixante mètres, avec une corde dans laquelle il avait entrelacé un fil de métal. Il vit jaillir de son appareil des étincelles de trois mètres de long, et de huit à dix centimètres de diamètre. Franklin ne tarda pas à découvrir le pouvoir des pointes, et il en fit l'application aux paratonnerres. La science lui doit encore d'avoir cherché à ranger dans un ordre méthodique tous les faits connus. A cet effet, il créa un système qui a encore des partisans, bien qu'il ne satisfasse plus aux besoins de la science. Ce philosophe posa en principe que les effets de l'électricité étaient le résultat du mouvement d'un fluide particulier qui agit par répulsion sur ses propres molécules, et par attraction snr celles de la matière; qu'il existait dans les corps uue certaine quantité de fluide à l'état latent, et que, si cette quantité était augmentée, le corps était électrisé en plus; si elle était diminuée, il était électrisé en moins. Dans ce système, l'électricité vitrée était de l'électricité positive; l'électricité résineuse, de l'électricité négative. L'électricité devint si populaire à cette époque, que l'on vit passer les appareils électriques du cabinet du physicien sur la place publique, entre les mains du bateleur.

Les actions par influence exercées par un corps électrisé sur un corps isolé, placé à peu de distance, paraissent avoir été observées pour la première fois par les missionnaires de Pékin, qui les annoncèrent en Europe en 1755. Ces actions furent étudiées par Canton, OEpinus, Wilke, Signa, Franklin, qui en fit l'application au tableau magique, Beccaria et Volta; mais Wilke et OEpinus sont les physiciens qui ont le plus fait pour avancer cette partie de l'électricité. Le principe général peut s'énoncer ainsi : quand un corps électrisé est placé à peu de distance d'un autre isolé et non électrisé, ce corps décompose l'électricité naturelle de celui-ci, attire celle de nom contraire, et repousse l'autre dans la partie la plus éloignée; si l'on touche celle-ci, le corps se trouve électrisé. On se mit à l'œuvre de toutes parts pour étudier les propriétés les plus générales de ce singulier agent. Lemonnier observait le premier qu'il y avait presque toujours dans l'air de l'électricité positive, sans qu'il y eût apparence d'orage, et que cette électricité était soumise toutes les vingt-quatre heures à des variations régulières d'intensité dont Beccaria donna les lois. Vilke, OEpinus et d'autres physiciens s'occupèrent des propriétés de la tourmaline par la chaleur; OEpinus prouva que les effets étaient électriques, et Canton en donna les lois. Il prouva, en effet, que la

tourmaline n'acquérait la propriété polaire que lorsqu'elle était dans un état d'échauffement ou de refroidissement, et que, dans les deux cas, il y avait renversement de pôle, c'est-à-dire que le pôle qui était positif en premier lieu devenait négatif, et réciproquement.

Vers 1764, on commençait déjà à rechercher l'influence que l'électricité pouvait avoir comme force chimique. Franklin observait que le fer devenait rouge, à force d'être exposé aux décharges électriques; Priestley annonçait, sous forme d'interrogations, qu'il était possible de changer les couleurs bleues des végétaux en rouge, au moyen de l'électricité; Beccaria fondait le verre, le borax, avec des décharges électriques, revivifiait les métaux de leurs oxydes, et décomposait le sulfure de mercure. Le premier observa que, lorsque l'on fait passer des étincelles dans l'eau entre deux fils conducteurs, il s'élevait des gaz dont il ne détermina pas la nature. Les actions par influence continuèrent à occuper l'attention des physiciens, ainsi que la distribution du fluide électrique sur la surface des corps électrisés; Beccaria démontra que toute l'électricité se transportait à leur surface; Lemonnier fit voir qu'à égalité de surface entre deux corps, la forme de chacun d'eux exerçait une influence sur la répartition de l'électricité. En 1798, Volta montra que de deux cylindres de même surface, le plus long recevait la plus forte charge. L'année précédente, il avait eu l'heureuse idée d'enflammer un mélange d'hydrogène et d'oxygène au moyen de l'étincelle, dans un appareil qu'on a appelé depuis *eudiomètre*, et qui se trouve aujourd'hui dans tous les cabinets de physique. Ce physicien venait encore de donner le condensateur, à l'aide duquel on pouvait recueillir de très-petites quantités d'électricité. Coulomb, de 1785 à 1786, fit faire un grand pas à l'électricité; il découvrit, à l'aide de la balance de torsion, 1° les lois suivant lesquelles s'exercent les attractions et répulsions électriques, lois qui sont les mêmes que celles qui régissent le mouvement des planètes autour du soleil, c'est-à-dire que ces actions avaient lieu en raison directe des quantités d'électricité possédées par les deux corps en présence, et en raison inverse du carré de leur distance; 2° celles d'après lesquelles l'électricité accumulée sur une surface se perd, soit par le contact de l'air, soit par les supports qui ne la retiennent qu'imparfaitement. Pour un même état de l'air dans un temps très-court, la déperdition est proportionnelle à son intensité. Quant à la faculté isolante, il détermina le degré de réaction électrique auquel chaque support commence à isoler parfaitement; l'intensité de cette réaction est proportionnelle à la racine carrée de sa longueur. Cou-

lomb confirma le fait observé par Beccaria, relativement à la répartition de l'électricité sur la surface des corps; mais il fit plus, il détermina, à l'aide de la balance de torsion et d'un petit plan d'épreuve en métal fixé à un manche isolant, avec lequel il touchait successivement toutes les parties d'un corps, et qu'il transportait ensuite dans la balance; il détermina, dis-je, rigoureusement la distribution de l'électricité sur des corps de forme cylindrique et conique, ainsi que sur des lames minces et isolées. Dans ces dernières, ainsi que dans les cylindres très-allongés, il trouva qu'il y avait accumulation d'électricité aux extrémités; et partit de là pour expliquer le pouvoir des pointes.

Tant de faits nouveaux commençaient à faire entrevoir le rôle que le fluide électrique devait jouer dans la nature. On s'exagéra même son importance, tant cet agent prêtait à l'illusion, comme il y prête encore aujourd'hui; mais il était impossible de prévoir alors comment son action pouvait intervenir dans les phénomènes moléculaires. Volta, qui s'était déjà fait connaître en physique par la découverte de divers instruments précieux, devait nous révéler le moyen d'établir les rapports entre les affinités et les forces électriques. Les effets physiologiques produits par l'électricité n'avaient attiré que faiblement l'attention des physiciens, lorsqu'en 1790, le hasard, mais un de ces hasards heureux, dont un homme de génie sait seul tirer parti, conduisit Galvani, professeur d'anatomie à Bologne, à la découverte d'un principe dont les applications sont immenses pour la philosophie naturelle, et dont voici l'énoncé. Si les muscles cruraux d'une grenouille nouvellement tuée sont entourés d'une armure métallique, les nerfs lombaires d'une armure d'un autre métal, et que les deux métaux soient mis en contact, la grenouille se contracte aussitôt. Galvani attribua ce phénomène à l'existence d'une électricité propre au système des animaux, laquelle passait des muscles aux nerfs par l'intermédiaire de l'arc métallique. Cette théorie fut le sujet d'une longue controverse entre Galvani et plusieurs physiciens, et entre autres, Volta, professeur de physique à Pavie. Volta s'attacha à démontrer qu'il n'existait pas d'électricité propre aux animaux, et que ceux-ci ne servaient que de conducteurs, en raison de l'humidité dont les muscles et les nerfs étaient imprégnés, et que l'effet physiologique devait être rapporté à l'électricité dégagée au contact des deux métaux et qu'il recueillait avec son condensateur. Galvani combattit cette opinion en montrant que l'arc métallique n'était pas nécessaire pour exciter les contractions, puisqu'elles avaient lieu

également en mettant en contact les muscles et les nerfs. Volta répondit que ce fait n'était qu'une généralisation de son principe, d'après lequel deux corps différents, suffisamment bons conducteurs, liquides ou solides, se constituaient toujours dans deux états électriques différents par leur contact mutuel. La théorie du contact fut attaquée dès l'origine par plusieurs physiciens, entre autres par Fabroni, qui, en s'appuyant sur des expériences intéressantes, avança le premier que l'électricité dégagée au contact avait pour cause une action chimique. De toutes parts on s'occupa des phénomènes de Galvani et de Volta; l'école de médecine de Paris prit un vif intérêt au galvanisme, en raison de ses applications à la physiologie. Une commission fut choisie pour répéter et étendre les expériences, mais sans qu'il en résultât rien de bien intéressant pour l'art de guérir. L'Institut national, ébranlé par le mouvement général, nomma aussi une commission pour examiner et vérifier les phénomènes galvaniques. On interrogeait successivement tous les organes de l'homme, des animaux et des plantes, par l'excitation métallique, c'est-à-dire, de l'électricité dégagée au contact de deux métaux. On croyait pouvoir saisir un des fils de la vie. M. de Humboldt, qui commençait alors sa carrière scientifique, publia, en 1798, un ouvrage sur le galvanisme, dans lequel on remarque quelques faits intéressants.

La lutte continuait toujours entre les partisans de Galvani et ceux du contact, lorsque, le 20 mars 1800, Volta écrivit à sir J. Bank, président de la société royale de Londres, pour lui annoncer une de ces grandes découvertes qui attirent l'attention générale et impriment une direction nouvelle aux sciences. Volta venait de découvrir la pile, le plus admirable instrument que les sciences aient produit, et auquel la reconnaissance publique a consacré le nom de son auteur. Peu après, Nicholson et Carlisle, en analysant le passage de l'électricité de la pile dans un liquide, au moyen de deux fils métalliques en communication avec les pôles, découvrirent la décomposition de l'eau: l'oxygène se dégageait du côté positif, et l'hydrogène du côté négatif. Nicholson remarqua ensuite la décomposition des sels métalliques; enfin, Berzélius reprit ces expériences et en étudia diverses particularités avec sa sagacité ordinaire. Il fut alors bien démontré que l'oxygène et les acides se transportaient au pôle positif, l'hydrogène et les bases au pôle négatif. Partout on se mit à l'œuvre pour étudier l'action chimique de l'électricité.

En 1801, Volta vint à Paris, pour exposer sa théorie de la pile en

présence de la classe des sciences physiques et mathématiques de l'Institut national. Napoléon, qui assistait à la séance, après quelques observations pleines d'intérêt, proposa de décerner une médaille d'or à Volta pour sa grande découverte. Une commission nommée à cet effet ratifia la proposition du premier consul, qui s'était passionné pour le galvanisme, dont il aimait à s'entretenir avec les savants. Il avait prévu, dès les premières découvertes de Volta, tout le parti que l'on pouvait en tirer pour la philosophie naturelle; il le prouva en créant deux prix, le 26 prairial an X (1802), l'un de 3,000 fr. pour la meilleure expérience faite dans le cours de chaque année sur le fluide électrique, et l'autre de 60,000 fr., *pour la personne qui, par ses expériences et ses découvertes, ferait faire à l'électricité et au galvanisme un pas comparable à celui qu'avaient fait faire à la science Franklin et Volta*. Ce dernier prix ne fut jamais accordé. L'appel fait aux physiciens par Napoléon provoqua de toutes parts des recherches sur l'application de la pile.

En juin 1801, MM. Thénard et Hachette enflammèrent des fils fins de métal, qui réunissaient les deux pôles d'une pile. De toutes parts on cherchait à construire des piles qui pussent fonctionner longtemps et d'une manière sensiblement uniforme; mais la science n'était pas assez avancée pour qu'on pût résoudre encore la question. Davy, qui commençait à attirer l'attention publique par ses travaux, en construisit de diverses espèces, et montra en même temps qu'on pouvait renverser à volonté les pôles; il se servit, à cet effet, de disques de cuivre et de fer fonctionnant avec une solution de sulfure de potassium. La pile verticale de Volta présentant de grands inconvénients lorsque le nombre des couples était considérable, Cruikshans en imagina une horizontale dont les couples étaient renfermés dans une auge en bois : cette disposition est restée dans la science. Pépys annonça que la présence de l'oxygène était indispensable pour que la pile fonctionnât; MM. Biot et F. Cuvier confirmèrent ce fait et en étudièrent les conséquences. Pour démontrer l'identité entre l'électricité galvanique et l'électricité ordinaire, et lever par conséquent tous les doutes qui pourraient exister encore à cet égard, Wollaston fit voir qu'on pouvait, avec l'électricité ordinaire, produire tous les effets chimiques de la pile; il lui suffit pour cela de faire arriver l'électricité dans une solution par des pointes de fils très-fins de métal, placés dans des tubes de verre soudés à l'un des bouts. Cette expérience détruisit complétement la théorie de Galvani. Ritter, qui se livra avec ardeur à l'étude des propriétés chimiques de la pile, observa que

deux lames de platine qui avaient servi à décomposer l'eau acquéraient une propriété polaire, en vertu de laquelle elles devenaient aptes à produire un courant secondaire dirigé en sens inverse, quand on les mettait en communication au moyen d'un fil de ce métal. Il partit de ce principe pour former des piles secondaires avec des disques d'un même métal et des rondelles de carton mouillé.

L'action chimique de la pile occupait alors tous les esprits. Davy étudiait les phénomènes de la chaleur produite dans les décompositions électro-chimiques, et préludait ainsi aux brillantes découvertes dont il devait plus tard enrichir les sciences physico-chimiques.

Les expériences de Nicholson, de Berzélius et autres physiciens, avaient bien fait connaître la décomposition de l'eau et des sels au moyen de la pile; mais il restait encore à analyser les phénomènes produits en tenant compte de la nature des fils conducteurs. MM. Berzélius et Hisinger reprirent cette question, et trouvèrent une foule de résultats nouveaux qui se présentaient à quiconque interrogeait avec sagacité la pile : on étudia également son action sur les substances organiques.

Brugnatelli observa que le sang se coagulait au pôle positif en se décolorant, tandis qu'au pôle négatif il prenait une couleur noire. D'autres liquides animaux se comportèrent de même. Le 21 thermidor an x, Vassali Eandi, Giulio et Rossi publièrent le résultat d'expériences galvaniques sur le cœur, les artères, et sur les cadavres de sujets décapités, pendus ou noyés. Ils annoncèrent que le cœur était un des premiers organes à perdre son excitabilité galvanique.

Les médecins travaillaient, de leur côté, à tirer parti de l'action physiologique de la pile pour soulager l'humanité souffrante; mais les résultats ne répondirent pas à leur attente. Aucune théorie n'avait encore été donnée pour expliquer les décompositions électro-chimiques; Grotthus en proposa une qui satisfait encore jusqu'à un certain point aux besoins de la science. Il partit de ce principe, que l'eau ou toute dissolution soumise à l'action de la pile est une véritable pile secondaire, dont les parties constituantes obéissent à l'action du courant qui, en les polarisant, les déplace successivement en les transportant jusqu'aux pôles, ou elles s'arrêtent, parce qu'elles ne peuvent pénétrer dans le métal.

Nous arrivons à 1806, à une époque qui fut une ère nouvelle pour l'électro-chimie. Davy avait déjà publié des travaux qui avaient attiré sur lui l'attention des savants, mais qui ne le mettaient pas encore hors de ligne. Les phénomènes de décomposition étaient tou-

jours enveloppés de beaucoup d'obscurité : on ne pouvait expliquer, par exemple, pourquoi, en opérant la décomposition de l'eau distillée dans des vases de verre, on avait de la soude au pôle négatif et du chlore au pôle positif. Des effets analogues étaient produits dans des vases de diverse nature. Davy démontra que les substances recueillies provenaient des vases mêmes, dont les éléments étaient séparés sous l'influence de l'électricité ; il montra l'exactitude de ce fait dans un grand nombre de cas. Ayant reconnu qu'en mettant les doigts bien lavés en contact avec de l'eau distillée faisant partie d'un circuit voltaïque, on obtenait du côté positif un mélange d'acides sulfurique, hydrochlorique et phosphorique, et du côté négatif une substance alcaline ; il conçut dès lors la pensée d'introduire dans les organes des animaux vivants diverses substances acides ou alcalines, pour modifier les parties constituantes de ces organes ou les sécrétions qu'ils produisent.

Toujours préoccupé de l'idée qu'avec l'électricité on parviendrait à vaincre les plus fortes affinités, même celles qui avaient résisté jusque-là aux moyens les plus énergiques de la chimie, il essaya de réduire les alcalis soupçonnés être des oxydes, c'est-à-dire, de retirer les métaux que l'on supposait en être les radicaux. Il obtint, en effet, au pôle négatif, avec une pile de 250 éléments, de petits globules ayant l'éclat métallique, et qui brûlaient avec explosion au contact de l'eau en produisant de la potasse ou de la soude. La vive déflagration qui avait lieu à l'instant du contact avec l'eau provenait de la décomposition de celle-ci. Davy parvint encore à obtenir une plus grande quantité de *potassium* et de *sodium* (noms donnés aux nouveaux métaux) en les combinant immédiatement avec le mercure à l'instant de leur apparition, et volatilisant ensuite ce dernier par la chaleur. Il forma de la même manière les amalgames de barium, de calcium et de strontium ; la magnésie et les autres terres ne donnèrent aucun résultat. Quant à l'ammoniaque, Seebeck ayant obtenu à la même époque avec cet alcali un amalgame solide, ce composé nouveau fut le sujet d'une discussion entre Davy et MM. Gay-Lussac et Thénard, après laquelle il demeura prouvé que cet amalgame n'était qu'une combinaison d'ammoniaque, de mercure et d'hydrogène.

L'expérience avait prouvé dès l'origine qu'il fallait détruire l'un des deux métaux de la pile pour la faire fonctionner. On chercha s'il n'était pas possible d'arriver au même but sans employer de liquide. Les premières recherches faites à cet égard, en 1803, sont dues à MM. Hachette et Desormes, qui remplacèrent le liquide par la colle

d'amidon. En 1809, Deluc trouva une combinaison de couples voltaïques qui donnait des effets électriques de tension; Zamboni perfectionna cet appareil, auquel on a donné le nom de *pile sèche*, qui n'a rendu jusqu'ici que peu de services à la science.

Tout en s'occupant des effets chimiques de la pile, on cherchait à établir les rapports entre les affinités et les forces électriques. Avant la découverte de la pile, les physiciens avaient avancé, mais d'une manière vague, et nous mettrons en tête l'abbé Nollet, que l'électricité était le feu élémentaire qui produisait la chaleur, la lumière, les actions magnétiques et chimiques. A cette époque, on n'avait encore que les prévisions du rôle important que l'électricité devait jouer dans la nature. Wilke et Ritter avaient cherché aussi à établir cette doctrine, ainsi que Winterle, qui, en raison de la manière dont il considérait l'acidité et l'alcalinéité, avait préparé les esprits à l'adoption d'une théorie électro-chimique. En 1799 et 1800, M. OErsted avait publié plusieurs mémoires dans le but d'établir l'identité entre les forces électriques et les forces chimiques; (mais les faits connus alors n'étaient pas de nature à donner beaucoup de consistance à toutes les idées émises). Les vues théoriques qui y sont consignées le conduisirent plus tard à la découverte de l'action d'un courant électrique sur un aimant. La science en était arrivée à ce point, qu'on ne savait quelle théorie adopter pour expliquer les phénomènes chimiques, calorifiques et lumineux, lorsque Davy jeta les bases d'une théorie électro-chimique, en s'appuyant sur des expériences dont plusieurs ne sont pas exactes, mais qui eut l'avantage de rallier tous les esprits. Voici les bases de cette théorie. Toutes les fois que deux substances peuvent se combiner ensemble, elles se constituent dans deux états électriques différents par leur contact mutuel, et si ces deux états sont suffisamment exaltés pour donner aux molécules une force attractive supérieure au pouvoir de l'agrégation, il éclate du feu, c'est-à-dire de la chaleur et de la lumière, par suite de la réunion des deux électricités, et il se forme alors une combinaison : les signes d'électricité disparaissent quand la combinaison commence. On ne voyait pas la cause qui tenait accolées les molécules les unes aux autres; Davy éluda donc la difficulté.

M. Berzélius reprit cette théorie, lui donna de grands développements, et en fit la base de la chimie moderne. On lui doit particulièrement d'avoir établi des rapports entre les pouvoirs électriques des corps et leurs propriétés chimiques, que Davy n'avait fait qu'indiquer. Ayant vu tout ce que la théorie de Davy avait de défectueux,

il crut pouvoir y remédier en supposant que les atomes des corps possédaient une certaine polarité électrique, comme la tourmaline, et une différence d'intensité dans l'action de chaque pôle, seul moyen d'expliquer comment un corps était, tantôt électro-positif, tantôt électro-négatif. Suivant lui, une combinaison ne peut s'effectuer qu'autant que les particules polarisées dans les deux corps se meuvent avec assez de facilité pour qu'elles présentent les unes aux autres leurs pôles opposés. Mais cette manière de voir ne peut guère être admise, attendu que la tourmaline n'étant électrique que lorsqu'elle se dilate ou se contracte par l'effet de la chaleur, il s'ensuivrait que, lorsque la température serait stationnaire, les affinités ne devraient pas s'exercer.

M. Ampère, dont les vues élevées ont été souvent utiles aux sciences physico-chimiques, rejeta la polarité électrique, et admit que les atomes des corps possédaient chacun une électricité propre, dépendante de leur nature, les atomes acides étant éminemment négatifs, les atomes alcalins éminemment positifs; que ces électricités étaient dissimulées par une électricité de signe contraire, formant une atmosphère autour de chaque atome : suivant lui, dans les combinaisons, il y avait recomposition des deux atmosphères, et les atomes restaient unis en vertu de l'attraction réciproque de leur électricité. Cette théorie ingénieuse ne pouvait rendre compte de tous les faits observés, entre autres, pourquoi un corps était, tantôt électro-positif par rapport à un corps, tantôt électro-négatif par rapport à un autre; aussi, après avoir fixé pendant quelque temps l'attention des physiciens, n'est-elle restée dans la science que comme un monument de la sagacité de son auteur. Au surplus, les théories passent en général, et les faits restent; aussi, doit-on s'occuper à réunir le plus de faits possibles et à les classer, afin de trouver les rapports qui les lient, et en déduire des principes ou des lois faciles à saisir.

On ne se borna pas néanmoins à des conceptions théoriques pour établir l'identité entre l'électricité et les fluides impondérables; Davy, qui avait annoncé que la chaleur et la lumière n'étaient que le résultat de la recomposition des deux électricités, voulut mettre ce principe hors de doute à l'aide d'une expérience des plus remarquables faite à l'institution royale de Londres, avec une pile composée de 2000 couples, présentant une surface de 128,000 po. anglais carrés.

En faisant passer entre deux pointes de charbon très-rapprochées

dans le vide la décharge de cette énorme pile, il obtint une lumière si intense qu'elle pouvait être comparée à celle du soleil. Les substances même les plus infusibles, placées entre les deux pointes de charbon, ne purent résister à une chaleur aussi forte, et furent ou fondues ou volatilisées. Tous ces effets, et le jet de la lumière se produisant toujours quand il éloignait les deux pointes de charbon, Davy en tira la conséquence que la chaleur et la lumière dégagées devaient être attribuées à la réunion des deux électricités. Cette expérience venait donc à l'appui de ses vues sur la théorie électro-chimique; et certes, jusqu'ici, rien ne prouve qu'il n'en soit pas ainsi.

Wollaston envisagea la question d'une manière inverse; il produisit des effets de chaleur avec des appareils voltaïques de la plus petite dimension. Enfin, on commençait à être persuadé que la lumière avait une origine électrique. Aussi, Brandt s'attacha-t-il à prouver que la lumière électrique, comme la lumière solaire, avait la propriété d'opérer des décompositions chimiques.

Le pouvoir conducteur des métaux avait déjà été l'objet de recherches de la part de Franklin; mais les moyens employés par ce physicien étaient trop imparfaits pour qu'il pût obtenir des lois. Davy, quoiqu'en se servant d'un procédé peu exact, trouva néanmoins que le pouvoir conducteur d'un fil de métal était en raison inverse de la longueur, et proportionnel à la section, et fut conduit par là à la détermination du pouvoir conducteur de chaque métal. D'autres physiciens reprirent cette question à l'aide de moyens plus précis. Tout en retrouvant la loi assignée par Davy à la conductibilité des fils de métal, ils n'obtinrent pas les mêmes nombres pour le pouvoir conducteur de chaque métal. Cette différence ne peut être attribuée qu'à l'emploi de métaux n'ayant pas le même degré de pureté, et à ce que les sources d'électricité employées n'étant pas les mêmes, le pouvoir conducteur a dû varier, selon que le courant électrique provenait d'une électricité à plus ou moins forte tension; quoi qu'il en soit, il a été prouvé par toutes les expériences faites que les métaux qui sont les meilleurs conducteurs de l'électricité, sont aussi ceux qui conduisent le mieux la chaleur.

Aussitôt après les découvertes de Galvani et de Volta, l'attention des physiologistes et des physiciens se porta sur les phénomènes que présentent les poissons électriques. On s'appliqua surtout à découvrir les organes générateurs de la commotion. Galvani, quoique affaibli par l'âge et par une maladie qui le conduisit au tombeau, se trans-

porta sur les bords de la mer Adriatique, en 1797, pour étudier l'anatomie de la torpille.

Redi et Lorenzini avaient avancé que les commotions étaient dues à l'électricité animale; explication qui flattait singulièrement Galvani. Ce dernier étudia les organes électriques que les anciens avaient déjà reconnus, comme on l'a vu (page 19). Il trouva de plus, après un grand nombre d'expériences, que les prismes dont se composent ces organes recevaient plus de nerfs que ne semblait l'exiger leur structure. Il fut conduit par là à examiner jusqu'à quel point le cerveau de la torpille, origine des nerfs, influait sur l'action des organes. Ces recherches lui firent admettre que le système des nerfs, qui sert à leur action, diffère de celui que la nature emploie pour exciter les contractions musculaires.

M. Geoffroy Saint-Hilaire ayant fait l'anatomie de plusieurs poissons électriques, et comparé leurs organes électriques, trouva dans tous une constitution uniforme. Volta, aussitôt après avoir analysé les effets de contact, s'occupa des phénomènes de la torpille; il eut l'idée qu'à l'aide de corps moins bons conducteurs que les métaux, tels que des membranes et des liquides, on pourrait former un appareil propre à produire des secousses et des étincelles. Il s'empressa aussitôt d'appliquer ce principe aux organes électriques de la torpille, composés de deux seuls conducteurs humides. Suivant cette théorie, la commotion que donne ce poisson serait le résultat d'un effet mécanique et non d'un effet instinctif, ce qui ne saurait être admis puisqu'elle dépend de la volonté de l'animal.

MM. de Humboldt et de Bonpland, pendant leur séjour en Amérique, firent des observations curieuses sur les habitudes et le moyen de pêcher le gymnote. Dans quelques expériences qu'ils firent, ils ne purent découvrir aucune apparence lumineuse ni aucune trace d'électricité libre à l'instant où l'animal donne la commotion. Il ne pouvait en être autrement, attendu, d'une part, que l'étincelle ne pouvait être aperçue que par des appareils fondés sur des propriétés de l'électricité qui n'étaient pas encore connues, et que pour recueillir de l'électricité libre il aurait fallu également des appareils encore inconnus.

MM. de Humboldt et Gay-Lussac firent, en 1802, quelques expériences à Gênes sur la torpille, et reconnurent que la commotion ne se faisait sentir que lorsqu'elle était élevée au-dessus de la surface de l'eau, et qu'il fallait l'exciter pour produire le phénomène. On ignorait alors, quoiqu'on le soupçonnât, que le phénomène de la tor-

pille et du gymnote fût un phénomène électrique. On n'a pu le prouver que lorsque John Davy, nous et plusieurs autres physiciens eûmes démontré que pendant la décharge de l'animal il se produisait des effets électriques tels, que le dos de l'animal fournissait l'électricité positive et le ventre l'électricité négative.

Le P. Linari et M. Matteucci obtinrent, il y a quatre ans, des étincelles, pendant la décharge, à l'aide des phénomènes d'induction dont nous parlerons plus loin. M. Matteucci, en étudiant le cerveau d'une torpille, découvrit que le quatrième lobe possédait seul la faculté électrique, de telle sorte qu'on pouvait détruire les autres lobes sans enlever à l'animal la propriété électrique, laquelle était transmise du quatrième lobe à l'organe électrique. Le même physicien fit encore d'autres observations intéressantes sur la torpille, que nous exposerons en traitant de l'intervention des forces physiques dans les phénomènes de la vie.

Nous avons anticipé sur les dates pour ne pas scinder tout ce qui concerne les poissons électriques, qui seuls peuvent nous révéler de quelle manière l'électricité intervient dans les phénomènes de la vie. Jusqu'en 1812, on n'avait pas encore enchaîné par l'analyse tous les faits relatifs à l'électricité statique que Coulomb et autres physiciens avaient observés.

M. Poisson entreprit de résoudre cette grande question. En considérant chacun des deux principes électriques comme un fluide incompressible dont les molécules, douées d'une parfaite mobilité, se repoussent mutuellement et attirent celles de l'autre principe, en raison inverse du carré de la distance, et, en admettant, en outre, qu'à égale distance le pouvoir attractif est égal au pouvoir répulsif, M. Poisson chercha les conséquences mathématiques que l'on pouvait en tirer. Les résultats auxquels il a été conduit se sont trouvés d'accord avec ceux que Coulomb avait déduits de l'expérience. M. Poisson montra d'abord que tout le fluide électrique se porte à la surface des corps, où il forme une couche extrêmement mince dont il détermina la surface intérieure et l'épaisseur. Quant à la surface extérieure, elle se trouve être précisément celle du corps, puisque l'électricité n'y est retenue que par la pression de l'air. Quand le corps est une sphère, les deux surfaces de la couche électrique sont sphériques; avec un ellipsoïde, la couche est également un ellipsoïde concentrique et semblable.

M. Poisson a déduit de ses calculs que la tension de l'électricité à l'extrémité d'un cône deviendrait infinie si l'électricité pouvait s'y

accumuler. De même, dans un ellipsoïde très-allongé, la pression électrique serait très-faible à l'équateur, tandis qu'aux pôles elle pourrait acquérir une intensité considérable. Le pouvoir des pointes, pour soutirer l'électricité, a été démontré ainsi par le calcul.

Jusqu'en 1820, la science électrique se trouvait dans un état stationnaire, lorsqu'on apprit que M. OErsted, professeur de physique à Copenhague, venait d'annoncer dans un ouvrage écrit en latin, qu'une aiguille aimantée placée à peu de distance d'un fil de métal, qui joignait les deux extrémités d'une pile, éprouvait de la part de ce fil une action révolutive telle, que si l'aiguille se trouvait au-dessus du fil, elle était aussitôt déviée à angle droit, dans un sens ou dans un autre, suivant la direction du courant, et qu'au-dessous elle était déviée en sens inverse, tandis que si on la plaçait à droite ou à gauche, elle s'inclinait d'un côté ou de l'autre.

Immédiatement après cette importante découverte, M. Ampère commença une suite remarquable de recherches expérimentales et théoriques qui ont servi à jeter les bases de l'électro-dynamique. Il commença par montrer que l'action de la force électro-dynamique existe dans toutes les parties du fil conducteur, puis il indiqua la loi générale qui détermine le sens de l'aiguille dans chaque cas particulier. Il fit connaître ensuite le résultat de ses recherches sur les actions des courants les uns sur les autres, suivant qu'ils cheminent dans le même sens ou dans des sens différents, en sorte que, quelle que soit la direction de deux fils conducteurs, ils s'attirent lorsque les deux courants vont en s'approchant de la perpendiculaire commune aux directions des deux fils, ou en s'en éloignant; et se repoussent au contraire quand l'un tend vers cette perpendiculaire et l'autre va s'en éloignant. Par un procédé déduit de ses idées théoriques, M. Ampère aimanta des aiguilles d'acier en les plaçant dans la partie intérieure d'un fil conjonctif plié en hélice. La position des pôles était déterminée par celle des spires qui les enveloppaient. Puis il établit l'identité d'action entre les fils conjonctifs et les courbes fermées, suivant lesquelles il concevait des courants électriques dans des plans perpendiculaires à la ligne qui joint les deux pôles d'un aimant.

M. Arago observa bientôt après qu'un courant électrique parcourant un fil de métal, réagissait sur la limaille de fer qu'on lui présentait, et s'y déposait transversalement en formant des anneaux concentriques : la limaille retombait aussitôt que le courant avait cessé. M. Arago obtint de semblables effets en faisant passer dans les spires la décharge d'une bouteille de Leyde.

Davy aimanta de petites aiguilles d'acier en les frottant transversalement sur un simple fil conjonctif. M. Biot fit connaître, conjointement avec M. Savart, la loi suivant laquelle la force émanée du fil conjonctif s'affaiblit à diverses distances, en réagissant sur une aiguille aimantée librement suspendue ; cette loi peut s'exprimer ainsi : *La force exercée par le fil est transversale à sa longueur et révolutive, et elle décroît dans un rapport exactement proportionnel à sa distance.* M. Laplace trouva que l'effet était composé, et que la loi individuelle de chaque force élémentaire agissait en raison inverse du carré de la distance. Quant aux courants cheminant dans un fil plié, l'action était toujours réciproque à la distance; mais l'intensité absolue était plus faible pour le fil oblique que pour le fil droit, dans la proportion de l'angle formé par la direction d'un des bouts de fil avec l'horizon. L'action de chaque élément du fil oblique sur chaque molécule de magnétisme austral ou boréal, était réciproque au carré de sa distance à cette molécule, et proportionnel au sinus de l'angle formé par la distance au sommet de l'angle avec le fil.

M. Ampère détermina l'action des conducteurs pliés en hélice, et en déduisit un moyen très-simple pour neutraliser l'effet longitudinal d'un courant dans un conducteur plié en hélice, et en réduire l'action à l'effet transversal, qui se trouvait alors identique à celui d'un aimant.

Il donna après l'expression analytique des attractions et répulsions des courants électriques, en montrant que tous les faits relatifs à l'action mutuelle de deux aimants et d'un conducteur voltaïque, ou d'un aimant et de deux conducteurs, pouvaient être ramenés à une cause unique consistant dans une force tantôt attractive, tantôt répulsive, entre les portions infiniment petites de ce qu'il appelait courant électrique, mais agissant toujours suivant la ligne qui joignait leur milieu. Il admit encore que cette force n'était pas seulement fonction de la distance, mais qu'elle dépendait aussi des angles qui déterminent la position respective des deux portions infiniment petites des courants électriques de la ligne qui en joint les milieux.

En 1821, M. Faraday parvint à faire tourner un fil conducteur autour du pôle d'un aimant. M. Ampère obtint la rotation d'un aimant autour de son axe. Davy ayant plongé dans du mercure les extrémités de deux fils en communication avec les deux pôles d'une pile, approcha l'un des pôles d'un aimant puissant près de la surface du mercure en contact avec ces conducteurs, et vit aussitôt le mercure prendre un mouvement de rotation rapide dans un sens dépen-

dant de la nature du pôle de l'aimant. Il fit voir de plus qu'en faisant passer la décharge d'une très-forte pile entre deux pointes de charbon, le jet de lumière était attiré et repoussé selon le pôle en regard et le sens du courant.

M. Ampère, pour appuyer ses vues sur la théorie des aimants, montra qu'un fil de culvre, recouvert de soie, enroulé en hélice autour d'un tube de verre et parcouru par un courant, se comportait comme un aimant.

En même temps que M. Ampère étudiait les propriétés magnétiques des hélices, M. Schweigger, en Allemagne, imaginait le multiplicateur électrique, qui permit d'étudier la question du dégagement d'électricité, dans un grand nombre de circonstances où il n'était pas possible de le faire auparavant. Cet appareil, dans sa forme la plus simple, se compose d'un châssis en bois, ouvert sur deux faces, et autour duquel est enroulé un fil de cuivre recouvert de soie; une aiguille aimantée, librement suspendue à un fil simple de soie, est placée dans l'intérieur du châssis. Aussitôt que le fil est traversé par un courant, les actions partielles sur l'aiguille de chacune des circonvolutions s'ajoutent et produisent une résultante qui suffit pour faire dévier l'aiguille aimantée, même quand le courant est très-faible.

Entre les mains de Nobili, le multiplicateur ou galvanomètre acquit une grande sensibilité; il substitua à l'aiguille aimantée deux autres aiguilles semblables, fixées parallèlement l'une à l'autre, les pôles inverses en regard, à une tige très-déliée. Au moyen de cette disposition, l'action du magnétisme terrestre était très-faible. Cet appareil permet de connaître l'intensité du courant en fonction de la déviation, au moyen d'une table facile à établir.

M. Ampère, après avoir fait connaître l'action des courants les uns sur les autres et sur les aimants, avança que le globe terrestre se comportait dans son action sur les conducteurs et les aimants, de même que s'il existait dans le globe des courants électriques cheminant de l'est à l'ouest. Il ne suffisait pas d'indiquer que le phénomène avait lieu comme si des courants circulaient dans la croûte terrestre, il fallait encore rendre probable leur existence. M. Ampère, en s'appuyant sur les idées de Davy, émit l'opinion que le globe était peut-être formé d'un noyau métallique de potassium, de sodium, de silicium, et recouvert d'une couche d'oxyde; qu'à la surface de contact il s'opérait continuellement des réactions chimiques qui produisaient une foule de courants électriques auxquels on devait attribuer le magnétisme terrestre. On a fait à cette hypothèse deux objections capitales:

la première, que les substances qui composent la croûte étant en général de très-mauvais conducteurs, il était difficile d'admettre l'existence de courants électro-chimiques ; la seconde, que les réactions chimiques étant tumultueuses, s'il s'ensuivait des courants électriques, ils devaient circuler dans toutes sortes de directions, et que dès lors on ne voyait pas comment la résultante dût agir sensiblement toujours dans la même direction. De toutes parts on étudia les phénomènes électro-dynamiques.

M. de la Rive s'occupa de l'action exercée par la terre sur une portion mobile d'un circuit voltaïque fermé, et montra que cette action, dans un rectangle, par exemple, s'exerçait sur les portions verticales seulement. Il donna les lois de ce phénomène qui se déduisaient facilement de la théorie de M. Ampère ; aussi furent-elles admises par lui. Une polémique s'engagea alors entre M. Ampère, d'une part, MM. Davy, Berzélius, de l'autre. M. Berzélius regardait comme improbable l'hypothèse avancée par M. OErsted, que les effets magnétiques du courant fussent dus à un mouvement en hélice des deux électricités; la polarité double du conducteur lui parut être une supposition plus simple et plus vraisemblable.

M. Ampère répondit que les expériences mises en avant par M. Berzélius, pour défendre son opinion, rentraient également dans sa théorie, et que dès lors on ne devait pas chercher une autre explication que celle qui en découlait.

Davy, dans une lettre adressée à M. Ampère, sous la date du 20 février 1821, lui mandait qu'il doutait que le magnétisme eût une origine électrique. M. Ampère combattit encore cette opinion en s'appuyant sur sa théorie qui est aujourd'hui généralement admise.

Quelques années après que M. Arago eut trouvé l'action exercée par un courant électrique sur le fer non aimanté, M. Savary se livra à une suite de recherches d'un grand intérêt sur l'aimantation des aiguilles d'acier placées à diverses distances d'un fil de métal dans lequel on faisait passer la décharge d'une bouteille de Leyde. Il trouva que les aiguilles placées du même côté prenaient une aimantation plus ou moins forte selon la distance à laquelle elles se trouvaient du fil conducteur ; que les aiguilles les plus rapprochées n'étaient pas toujours les plus aimantées, attendu qu'il existait à diverses distances du fil des points où l'aimantation était à son maximum et d'autres à son minimum, et que la distance influait aussi sur le sens de la polarité. Il résultait de ces faits que le courant électrique paraissait produit par le transport de la matière électrique qui avait

lieu d'une manière continue dans un sens déterminé, et que son action pourrait être envisagée comme une suite d'oscillations transmises du fil conducteur aux milieux environnants.

Peu de temps après la découverte des multiplicateurs, vers 1821, nous commençâmes à analyser les effets électriques produits dans les actions chimiques, ainsi que dans les phénomènes où l'équilibre naturel des molécules des corps est troublé par une cause quelconque. Fabroni et Wollaston avaient essayé de traiter cette question, mais les moyens leur manquaient pour en obtenir la solution; sans la découverte de M. OErsted, il est probable qu'on ne serait pas plus avancé. Cette question devant être exposée avec de grands développements dans cet ouvrage, nous nous bornerons à dire que, dans la combinaison d'un acide avec un alcali, le premier dégage de l'électricité positive, le second, de l'électricité négative; que dans les doubles décompositions, il n'y a pas d'effets électriques produits; que les dissolutions produisent des effets électriques semblables à ceux observés dans les combinaisons; que dans les décompositions les effets électriques produits sont inverses. Parmi les physiciens qui ont contribué à l'avancement de l'électro-chimie, nous devons mentionner M. Auguste de la Rive, dont les travaux ont eu pour but constant de combattre la théorie de Volta. On lui doit surtout d'avoir posé en principe que le contact seul de deux métaux ne donne lieu à aucun effet électrique. Nous aurons l'occasion de rappeler souvent, dans cet ouvrage, les travaux de cet habile physicien.

De 1821 à 1822, Seebeck, de Berlin, découvrit les phénomènes thermo-électriques, en montrant qu'une différence de température entre les deux soudures d'un circuit fermé, composé de deux métaux différents, produisait un courant électrique, dont nous avons déterminé les lois. Nous avons appliqué ces phénomènes à la détermination de la température des parties intérieures du corps de l'homme et des animaux, à celle des fourneaux, des lacs, et, en général, de tous les milieux qui ne permettent pas d'employer les thermomètres ordinaires. L'analyse de ces phénomènes nous a conduit à montrer que la propagation de la chaleur dans les métaux, et en général dans les corps conducteurs, s'opère en vertu de décompositions et de recompositions électriques successives. Les piles thermo-électriques servirent ensuite à MM. Nobili et Melloni à évaluer les plus basses températures, celles des insectes, de la combustion lente du phosphore, etc.; puis à M. Melloni, pour faire une foule d'expériences du plus haut intérêt sur les propriétés de la chaleur rayonnante.

Davy qui, dans tous ses travaux, ne perdait jamais l'occasion d'appliquer aux arts les résultats de ses expériences, indiqua un moyen à l'aide duquel il était possible de garantir le cuivre de l'action corrosive de l'eau de mer, moyen qui n'a pas eu le succès qu'on s'en était promis, attendu que le métal préservé à l'aide de petites lames de fer se recouvre de carbonate de chaux, de magnésie, de plantes marines et de mollusques, qui, augmentant le poids du doublage, retardent la marche du navire.

En 1824, M. de la Rive publia le résultat de ses recherches sur la diminution de l'intensité d'un courant électrique qui traverse un liquide interrompu par des diaphragmes métalliques, d'où il déduisit des lois qui ont quelque analogie avec celles que présentent la lumière et la chaleur dans leur propagation; et en outre, que le passage de l'électricité dans un liquide est d'autant plus facile que l'action chimique entre le métal et le liquide est plus marquée.

Cette question, qui est d'une grande importance pour les décompositions électro-chimiques, a été reprise, il y a peu de temps, avec l'appareil électro-magnétique à courant alternatif, par divers physiciens.

M. Poggendorf (*An. der Physiken and Chemie*, t. LII, p. 497), s'est appliqué à établir que, indépendamment de la non polarisation des lames qui ont servi à conduire les courants alternatifs dans un liquide, il y a, à la surface de contact, entre les solides et les liquides, une résistance au passage indépendante de la conductibilité, mais qui varie suivant la nature du liquide, celle du métal, l'état de sa surface, etc.

M. Vorselmann de Herr (*An. der Physik*), en s'appuyant sur l'observation de M. de la Rive, que des courants magnéto-électriques dirigés alternativement en sens contraire, n'éprouvent aucune résistance dans un liquide quand on interpose sur leur passage des diaphragmes métalliques, a cherché à rapporter la résistance des courants aux polarités secondaires. Cette opinion est opposée à celle de M. Poggendorf.

Fechner attribua l'effet à une espèce particulière de résistance qui a lieu au passage de l'électricité du métal dans le liquide, et réciproquement.

Nous passons sous silence les opinions émises par d'autres physiciens, pour dire que M. de la Rive, dans deux mémoires publiés en 1825 et 1828, a fait connaître le rapport suivant lequel l'accroissement de la surface métallique en contact avec le liquide, augmente

la facilité de transmission, ainsi que l'influence de la nature du liquide du diaphragme métallique et du liquide, et cela indépendamment de toute hypothèse sur la cause même du phénomène. Dès lors, ce physicien s'est toujours attaché à étudier le fait principal, sans s'occuper s'il était dû à un effet simple ou complexe ; mais par cela même que l'on a analysé depuis lui, les causes qui concourent à sa production, on ne doit pas annihiler le mérite de l'observation première.

Revenons maintenant à la théorie du contact fondée par Volta, qui posa en principe, que deux corps conducteurs de l'électricité se constituent toujours dans deux états électriques différents, par le seul fait du contact. Cette théorie, vivement combattue à son début par Galvani, Fabroni, Parrot, fut défendue par Pfaff, Davy qui admettaient néanmoins l'intervention de l'action chimique pour que le courant électrique pût circuler dans la pile. Wollaston, en s'appuyant sur des expériences intéressantes, rejeta le contact, et ne varia jamais dans ses opinions. Jusqu'à la découverte de l'électro-magnétisme, la théorie de Volta était presque généralement adoptée. Mais il n'en fut plus ainsi lorsque nous eûmes analysé, à l'aide du galvanomètre, les effets électriques produits dans les actions chimiques, et montré qu'il y avait absence de ces effets toutes les fois qu'il n'y avait pas action chimique lorsque deux métaux différents, en communication avec les deux bouts du fil d'un multiplicateur, plongeaient dans un liquide. M. de la Rive, s'appuyant sur une foule d'expériences ingénieuses, montra, peu de temps après, que la théorie de Volta était insuffisante pour rendre compte des effets de la pile.

En Italie, et en Allemagne surtout, la théorie de Volta s'est soutenue ; elle est même défendue, dans la dernière contrée, par des physiciens et des géomètres habiles. En France et en Angleterre, elle compte aussi quelques partisans. En raison de leur importance, nous allons exposer succinctement les opinions des physiciens allemands, en nous aidant de la notice impartiale de M. Élie Wartmann, insérée dans le premier numéro des *Archives de l'électricité*, publiées par M. de la Rive.

M. G. S. Ohm, d'Erlangen, a publié, en 1837, une théorie mathématique de la pile de Volta, avec l'intention d'exécuter pour le voltaïsme ce qu'avaient fait Fourier, Laplace, Poisson, Ampère, MM. Cauchy, Gauss, pour la chaleur, la capillarité, l'électro-dynamique et le magnétisme. Pour établir ses formules, M. Ohm est parti des trois lois fondamentales suivantes :

1° La *force électroscopique* est la quantité d'attraction ou de

répulsion exercée par un corps électrisé sur un autre, ayant un éta électrique invariable, appellé *électroscope*. Cette force varie dans le même temps d'une place à l'autre de l'intérieur d'un corps; de plus, elle varie dans la même place en divers temps.

2° La perte d'électricité qu'éprouve dans un temps de longueur invariable un corps plongé dans l'air, est proportionnelle à la quantité de cette électricité et a un coefficient qui dépend de la nature du corps. C'est la loi que Coulomb a déduite de ses expériences.

3° Lorsque deux corps hétérogènes sont en contact, il existe, aux points où ils se touchent, une force électroscopique constante et égale à la différence des forces qui leur sont propres. C'est la tension électrique.

Au moyen de ces trois lois, M. Ohm a cherché à représenter toutes les conditions auxquelles est soumis le mouvement de l'électricité dans des corps de forme et de nature quelconque; et il a pensé que les équations différentielles auxquelles elles conduisent sont tellement semblables à celles que Fourier et Poisson ont données pour le mouvement de la chaleur, que l'on pourrait déduire de cette similitude celle des deux fluides.

Hâtons-nous de faire remarquer que M. Ohm a vérifié l'exactitude de sa théorie dans le cas seulement où les diverses parties de la pile n'éprouvent pas des changements chimiques notables; or, ce sont précisément ces changements qui sapent la théorie de Volta; les écarter, c'est n'envisager la question que dans un cas particulier. Quoi qu'il en soit, voici les deux lois générales auxqnelles conduit l'analyse de M. Ohm :

1° Dans une pile formée par la réunion d'nn nombre quelconque de parties prismatiques se trouve sur chaque surface d'excitation un saut subit qui y produit la tension, et dans toutes les parties un passage uniforme et successif d'un bout à l'autre; *les rapports des différents passages sont inversement proportionnels aux produits des conductibilités par les sections de chaque partie.*

2° *La grandeur du courant est directement proportionnelle à la somme de toutes les tensions de la pile, et inversement proportionnelle à sa longueur réduite, soit à sa longueur divisée par le produit de sa conductibilité et de sa tension.*

Des formules qui expriment ces lois, on peut déduire tous les phénomènes, en faisant toujours abstraction des réactions chimiques.

M. Ohm, tout en évitant d'introduire dans ses formules les effets de l'action chimique, a cru devoir y reveuir dans un appendice

spécial. A ce sujet, il distingue l'électricité latente (qui est liée à l'essence des corps, et ne peut en être séparée sans que leur mode d'existence soit en même temps détruit) de l'électricité libre qui n'est pas nécessaire à la constitution des corps, et peut ainsi passer d'une de leurs parties à une autre, sans que par là ces parties soient contraintes d'échanger leur manière d'être spécifique.

Ces principes, qui ne sauraient être contestés, puisqu'ils sont admis par tous les électro-chimistes, ont permis à M. Ohm d'établir des équations à l'aide desquelles il répond à toutes les questions relatives au partage chimique et au changement qui en résulte pour le courant électrique. Mais, comme l'observe judicieusement M. de la Rive, il faudrait savoir si la pile hydro-électrique suit la loi que lui assigne la théorie. A cette importante question, l'expérience seule pouvait répondre, et elle a montré que les relations ci-dessus rapportées sont et demeurent vraies aussi longtemps que la pile peut être regardée comme un tout qui ne subit aucun changement, et n'est pas subdivisée en parties différentes; aussi ces équations s'appliquent-elles constamment à la pile thermo-électrique pendant la durée entière de son activité, pourvu que le mode d'excitation reste invariable.

M. Fechner, dans un ouvrage ayant pour titre : *Résultats numériques d'observations de la pile galvanique*, est entré dans les vues de M. Ohm. Dans la seconde édition de la traduction allemande qu'il a faite du *Traité de physique* de M. Biot, il a cherché à déterminer par l'expérience les divers éléments qui entrent dans la formule de M. Ohm, et a été conduit ainsi à les modifier, en y introduisant une quantité nouvelle, la résistance qu'éprouve le courant à passer d'une partie solide à une partie liquide, ou réciproquement; résistance dont nous avons déjà parlé.

M. Fechner a déduit de ses résultats numériques, que la force de la pile était directement proportionnelle à la force électro-motrice, et inversement proportionnelle à la résistance de conductibilité. Telle est la loi fondamentale de la pile de Volta, suivant les Allemands. Voici encore quelques autres conséquences auxquelles conduisent les recherches de M. Fechner.

Si l'on augmente ou diminue la résistance d'une portion quelconque de la pile, la force de l'appareil ne diminuera ou ne s'accroîtra que dans le rapport de cette partie de la résistance à la résistance totale. En rendant de plus en plus grande la résistance d'une aussi petite partie qu'on voudra, on finira par annuler totalement l'effet de la pile.

La force électro-motrice totale d'une pile est proportionnelle au nombre des couples lorsqu'ils sont homogènes, et à la différence des forces électro-motrices partielles lorsqu'on se sert de couples hétérogènes ; elle est liée, mais non d'une manière absolue, avec la nature du liquide et l'état de la résistance.

La résistance croît en proportion de leur longueur ; le courant traverse deux fils de longueur inégale, en raison inverse de leurs longueurs.

La résistance du liquide est proportionnelle à la distance des plaques des couples, et en raison inverse de la section du liquide, lorsque la surface qu'il baigne est égale à cette section. Elle décroît avec la quantité de parties salines ou acides qu'on ajoute au liquide ; elle est indépendante de la nature des plaques.

La résistance au passage est inversement proportionnelle à la surface excitatrice, et augmente à mesure que l'effet de la pile diminue. Elle décroît en raison de la quantité d'acide qu'on ajoute au liquide, et peut s'affaiblir encore par une nouvelle addition d'acide, après que la diminution d'effet de la pile l'a amenée jusqu'à une certaine valeur, inférieure à la première. Au moment où l'on ferme la pile, elle est la même pour les deux plaques ; mais elle devient par la suite plus grande pour la plaque négative. Enfin, elle a une tendance particulière à sauter d'un degré à un autre lorsqu'on change la force électro-motrice ou la résistance ; c'est ce qui arrive dans l'eau aciduiée, et surtout dans l'eau ordinaire.

Lorsque la surface excitatrice (celle qui est attaquée par le liquide) est divisée en plusieurs fractions communiquant entre elles, ou qu'on la laisse entière, peu importe pour la force de la pile, cette force s'accroît proportionnellement moins que la surface excitatrice : plus on augmente cette surface, plus le surcroît de force diminue proportionnellement. De sorte qu'on arrive à une limite où l'effet n'augmente plus, et c'est ce qui a lieu d'autant plus vite que la résistance du fil qui ferme la pile est plus considérable. La grandeur de ce maximum est indépendante de la conductibilité du liquide ; mais elle est d'autant plus petite que la résistance du conducteur est plus grande. Une augmentation dans la surface excitatrice contribue d'autant plus à un renforcement dans le courant, que la résistance du conducteur est plus faible, que la conductibilité du liquide est moindre, et en général que l'action de la pile a été plus prolongée.

Au commencement de la clôture de la pile, il est indifférent que la surface positive soit plus grande ou plus petite que la négative.

L'effet de la pile décroît plus vite lorsqu'on oppose une surface positive plus grande à une négative plus petite, que dans le cas contraire. Pendant le cours de l'action, on rend le courant moins faible en diminuant la surface positive qu'en diminuant la négative. Enfin, si l'on oppose à une surface positive une surface composée d'un métal positif et d'un métal négatif, on aura un arrangement équivalent à la disposition contraire.

En général, l'effet de la pile croît proportionnellement moins que le nombre des couples, et même il n'est pas augmenté lorsque la résistance du conducteur disparaît devant celle des couples, ou lorsque cette résistance croît dans le même rapport que le nombre des couples. De plus, par l'addition d'un nombre croissant de couples on arrive à une limite, à partir de laquelle une nouvelle adjonction n'a plus d'effet sensible; mais plus la résistance du conducteur est grande par rapport à celle des couples, moins vite le maximum est obtenu. Enfin, l'augmentation du nombre des couples contribue d'autant plus à la force de la pile, que la résistance du conducteur est plus grande, que la résistance des couples est plus petite, et que l'on est dans une période plus rapprochée du commencement de l'action.

Relativement à l'influence des diaphragmes, lorsqu'on interpose des plaques homogènes dans le liquide d'une pile, la force de l'appareil baisse; ce qu'on peut voir dès l'instant que le circuit est fermé. A ce moment, l'affaiblissement est exactement le même pour un couple zinc-cuivre, que les diaphragmes soient de l'un ou de l'autre de ces métaux; mais l'effet décroît plus rapidement avec des plaques de cuivre qu'avec des plaques de zinc. L'affaiblissement est uniquement dû à une augmentation de la résistance, car la force électro-motrice n'est nullement changée, et il est, au commencement, beaucoup plus fort dans l'eau ordinaire que dans l'eau acidulée; dans de l'eau très-acide, l'introduction de plusieurs plaques ne cause presque aucun décroissement d'effet au commencement de l'action. L'accroissement de la résistance totale est proportionnel au nombre des diaphragmes introduits. La résistance d'un diaphragme intermédiaire dans un liquide acide est, au commencement, exactement égale à la résistance du passage d'un couple excitateur de même surface; mais elle est beaucoup plus considérable dans l'eau ordinaire.

Quant à l'affaiblissement dans les piles voltaïques, considéré en général, on peut dire que pour le rendre le plus lent possible, il faut employer une pile simple dont les surfaces excitatrices soient grandes, éloignées les unes des autres, et plutôt zinc-étain que zinc-

cuivre, ou zinc-cuivre que étain-cuivre. Il faut, en outre, se servir d'un long conducteur de jonction, et comme liquide, d'une eau très-acidulée, ou même d'une solution de sulfate de cuivre. L'origine de cet affaiblissement dépend du changement chimique que subissent les plaques métalliques sous l'action du courant; changement qui, plus intense sur la plaque négative que sur la positive, augmente la résistance au passage et diminue la force électro-motrice. Telles sont les conséquences générales auxquelles conduisent les recherches de M. Fechner. Nous ne chercherons pas à discuter les différents travaux exécutés pour défendre la théorie du contact, attendu que cet examen nous forcerait à donner trop d'étendue à cette notice ; nous nous bornerons pour l'instant aux réflexions suivantes :

Des milliers d'expériences ont prouvé qu'il n'y a d'effets électriques de contact qu'autant qu'il y a action chimique, calorifique, ou bien un dérangement quelconque dans la position naturelle d'équilibre des molécules, et qu'il est impossible de rendre compte de tous les effets observés et des anomalies apparentes qui se présentent fréquemment, si l'on ne prend pas une de ces causes en considération. M. de la Rive, il faut le dire, est le premier qui se soit prononcé le plus énergiquement et de la manière la plus exclusive en faveur de cette opinion.

Les partisans de la théorie du contact, n'envisageant la question que sous un seul point de vue, puisqu'ils font abstraction des changements chimiques, ne peuvent expliquer que très-peu des effets électro-chimiques et autres, que l'on découvre chaque jour, et qui, en raison de leur nombre, débordent de toutes parts cette théorie, dont le seul avantage est de fournir à l'analyse mathématique un principe simple, à l'aide duquel on peut, dans quelques cas particuliers, déduire, de formules renfermant des constantes arbitraires, les résultats de l'expérience. C'est là un des motifs qui ont contribué à maintenir encore cette théorie dans la science. Au surplus, en se bornant à discuter sur un principe, sans apporter à l'appui de son opinion un autre ordre de faits que celui dans lequel on est resté longtemps, la science n'avance point, et chacun reste avec sa conviction; cet état de choses subsisterait encore si l'on n'eût pas démontré l'insuffisance de la théorie de Volta pour expliquer une foule de faits nouveaux.

Dans notre *Traité de l'électricité*, tout en nous expliquant d'une manière aussi positive sur la théorie du contact, nous avons néanmoins avancé que lorsque deux corps, ayant de l'affinité l'un pour l'autre, étaient en contact, sans qu'il y eût combinaison, il pourrait

arriver que l'action des forces chimiques, commençant à agir, troublât l'équilibre des molécules et mît en liberté une très-petite quantité d'électricité qui n'était pas capable de produire des courants électriques continus. Une observation extrêmement curieuse nous avait permis d'en tirer cette induction. Au surplus, voici les principaux faits sur lesquels nous nous appuyons pour attribuer à l'électricité de la pile une origine chimique.

1° Il n'y a pas d'action chimique sans un dégagement considérable d'électricité; 2° une pile de Volta, fonctionnant avec un liquide n'agissant chimiquement sur aucun des deux éléments dont se compose chaque couple, ne *se charge* pas, c'est-à-dire qu'elle ne donne ni courant, ni électricité de tension; un des deux éléments est-il attaqué, même très-faiblement par le liquide, on a aussitôt des effets de courant et des effets de tension; l'action chimique devient-elle plus considérable, ces actions croissent en intensité. En un mot, l'intensité des effets électriques est, jusqu'à un certain point cependant, en rapport avec l'énergie de l'action chimique.

On voit donc que, pour obtenir des effets électriques avec la pile, il faut détruire peu à peu l'un des deux métaux; de plus, le sens du courant dépendant de l'élément qui est le plus attaqué, on peut à volonté, dans une pile voltaïque, en la chargeant avec de l'eau acidulée, ou une solution de sulfure alcalin, changer le sens du courant. Dans le premier cas, le pôle positif est du côté zinc; dans le second, du côté cuivre.

Ces faits généraux, joints à une foule d'autres particuliers, ont mis à même d'en tirer la conséquence que l'électricité dégagée dans la pile émane entièrement de l'action chimique.

Ce principe une fois établi, on a pu expliquer, en s'appuyant surtout sur la théorie ingénieuse de M. de la Rive, comment il se fait qu'avec un seul couple on obtienne les mêmes effets décomposants qu'avec une pile de cent éléments, pourvu toutefois que le liquide ou les liquides qui servent à la faire fonctionner, soient disposés de manière à recueillir le plus possible de l'électricité dégagée. Ces effets ne sauraient être expliqués dans la théorie de Volta, qui pose en principe que la quantité d'électricité dégagée au contact de deux corps est si faible qu'il faut employer un condensateur pour en assurer la présence; ce qui n'est pas le cas dans nos appareils, où il n'entre qu'un seul couple.

En présence d'un si grand nombre de faits, favorables à la théorie électro-chimique, les partisans du contact ne peuvent s'empêcher de reconnaître l'influence de l'action chimique dans la production de

l'électricité de la pile. Mais, voulant néanmoins défendre pied à pied le terrain, quelques-uns d'entre eux, comme Davy, ont prétendu que l'action chimique n'agissait qu'en donnant naissance à des produits dont le contact avec les éléments de chaque couple était la cause des effets électriques. Cette objection, sans être sérieuse, pouvait être soutenue cependant, et elle le fut en effet par Davy, à une époque où l'on n'avait pas encore analysé les phénomènes électriques produits dans les actions chimiques; mais il est facile aujourd'hui de la détruire complétement, au moyen de l'observation suivante, due à M. Edmond Becquerel.

« Lorsqu'une substance agit sur une autre, sous l'influence de la lumière, il se produit des effets électriques, comme dans toutes les réactions chimiques, lesquels effets se manifestent tant que persiste cette influence. Vient-elle à cesser, il n'y a plus aucun signe d'électricité, et cependant le contact des substances nouvellement formées avec les lames métalliques subsiste toujours, et rien n'est changé dans le circuit. » Cette expérience, que nous regardons comme fondamentale et que nous rapporterons dans l'ouvrage, montre donc qu'un contact qui n'est pas suivi d'une action chimique ne saurait troubler l'équilibre des forces électriques. La lumière seule pouvait aider à la solution de cette question, puisqu'elle permet de faire naître ou disparaître à volonté l'action chimique sans détruire le contact; condition que ne peuvent remplir les agents chimiques ordinaires.

Au surplus, la question du dégagement de l'électricité dans la pile est tellement complexe, qu'elle ne saurait être scindée; pour la traiter complétement, il faut l'envisager sous les rapports physique et chimique, sans quoi on ne peut que s'égarer dans les conséquences que l'on tire des expériences.

L'électricité se compose aujourd'hui de faits tellement différents, qu'il est bien difficile de réunir, dans une même section, tous ceux qui ont des rapports entre eux, surtout si l'on veut suivre l'ordre chronologique des découvertes; aussi sommes-nous obligé, dans cet exposé de nos connaissances en électricité, de placer, à la suite les unes des autres, des parties qui semblent d'abord n'avoir aucune relation; mais cet inconvénient était inévitable. Le lecteur, qui a déjà pu s'en apercevoir, en aura une nouvelle preuve par ce qui va suivre :

Van Marum avait observé qu'en faisant passer la décharge d'une bouteille de Leyde dans un fil métallique et d'un petit diamètre, celui-ci diminuait de longueur; en confirmant ce fait, M. Edmond

Becquerel reconnut que ce fil affectait une disposition ondulée, qui semblait indiquer que l'électricité se transmit par une espèce de mouvement ondulatoire. Un effet semblable avait été observé dans des cordons de sonnette qui avaient été parcourus par la foudre.

L'action des aimants sur tous les corps avait déjà attiré l'attention de Coulomb au commencement de ce siècle; nous nous en étions occupé également, en cherchant en même temps comment se comportaient à leur égard les courants électriques, lorsque M. Arago découvrit, en 1825, ce fait extrêmement remarquable, que l'amplitude des oscillations d'une aiguille aimantée est influencée par le voisinage des substances métalliques qui l'entourent et que les oscillations ne diminuent pas dans leur vitesse, mais dans leur amplitude. Il fut ensuite conduit au fait suivant non moins remarquable : *Quand on place une aiguille aimantée librement suspendue au-dessus d'un disque de cuivre auquel on imprime un mouvement de rotation, l'aiguille se dévie d'un angle d'autant plus grand que le mouvement est plus rapide.*

MM. Herschel et Babbage répétèrent l'expérience d'une manière inverse, c'est-à-dire qu'ils firent tourner un disque de métal librement suspendu, en imprimant un mouvement de rotation à un aimant placé au-dessous. Ces phénomènes restèrent inexpliqués jusqu'à ce que M. Faraday, en découvrant les courants électriques produits par l'influence des aimants ou des courants électriques dans des conducteurs voisins, eût jeté un grand jour sur les rapports qui existent entre les aimants et les courants électriques. Il résultait, en effet, des travaux du savant physicien anglais, d'abord une vérification des vues théoriques de M. Ampère sur les aimants, puis une explication très-simple des phénomènes découverts par M. Arago. Ce travail est un des plus importants de l'époque.

M. Faraday a appelé *induction* voltaïque, ce pouvoir qu'ont les courants électriques d'exciter, sur la matière qui est près d'eux, cet état particulier dont on vient de parler. De là, les dénominations de *courant inducteur*, *courant induit*. En comparant la direction du courant inducteur à celle du courant induit, on voit que l'un et l'autre cheminent dans une direction contraire. Le courant induit n'a qu'une durée instantanée : vient-on à détruire le courant inducteur, il se produit un courant induit dans la même direction que ce dernier.

Des aimants introduits dans des spirales formées avec des fils de cuivre, produisent des effets semblables, et donnent, dès que l'on introduit l'aimant, un courant instantané dont la direction dépend

du pôle introduit ; en retirant l'aimant, on a un courant induit dirigé en sens inverse. Enfin, M. Faraday a obtenu dans des fils de métal, avec le magnétisme terrestre, les effets semblables à ceux qu'il avait observés avec les aimants.

De ces faits fondamentaux, on tire les conséquences suivantes :

1° Il est impossible qu'un globe de métal puisse tourner sans produire des courants électriques dans son intérieur, suivant un plan perpendiculaire au plan de révolution, pourvu que l'axe de rotation ne coïncide pas avec la direction de l'inclinaison magnétique ;

2° On ne peut mouvoir un morceau de métal en contact avec d'autres, sans produire dans ceux-ci des courants électriques ;

3° Un fil de métal ne peut changer de place, sans qu'il y ait production de courants induits ;

4° Dans les machines à vapeur ou autres qui renferment des parties métalliques mobiles, il se forme des combinaisons accidentelles magnéto-électriques produisant des effets encore inobservés.

A diverses époques, on s'est beaucoup occupé des mouvements gyratoires du mercure, et en général des mouvements excités dans les corps par l'électricité. Davy observa que des gouttes de mercure placées entre les deux pôles d'une pile, au fond d'un vase qui contenait une dissolution saline, prenaient un mouvement assez rapide et s'allongeaient du côté négatif. Herschel s'occupa du même phénomène, en étudia avec soin tous les détails, et fut conduit ainsi à des observations nouvelles que nous ne pouvons rapporter ici, en raison des détails dans lesquels nous serions obligé d'entrer pour en donner seulement une idée ; il en est de même des expériences de MM. Sérullas et Nobili sur le même sujet. En parlant des actions mécaniques produites par l'électricité voltaïque, nous ne devons pas oublier de mentionner l'expérience de M. Porrett, au moyen de laquelle il prouva que, lorsqu'un courant chemine dans un liquide médiocre conducteur, dans lequel se trouve un diaphragme en baudruche, le liquide est transporté de la case positive dans la case négative ; ce qui tend à prouver que l'électricité positive a plus d'aptitude pour vaincre les obstacles que l'électricité négative. D'autres faits analogues observés par nous, ont conduit à la même conséquence.

M. Fusinieri a analysé des effets de transport qui avaient été aperçus par Hawkesbée, Prietsley et Beccaria, savoir que : quand l'électricité sort d'un corps, elle emporte avec elle des particules de ce corps qu'elle dépose sur la surface de celui dans lequel elle entre. La foudre produit des effets semblables.

Les apparences électro-chimiques produites dans certaines dissolutions sur des plaques métalliques, par l'action décomposante du courant, ont été étudiées avec une grande sagacité par Nobili, qui a reconnu, dans ces apparences, des anneaux colorés présentant les teintes les plus riches et les plus variées ; en disposant ceux-ci avec art, il est parvenu à produire des dessins gracieux qui étalent les couleurs les plus brillantes, et dont les teintes habilement nuancées flattent agréablement l'œil.

On croyait, du temps de Davy, que pour obtenir de grands effets de décomposition, il était nécessaire d'employer des courants électriques très-énergiques ; mais nous avons démontré que cette condition n'était pas indispensable quand les éléments qui doivent être transportés par les courants se trouvaient déjà à l'état naissant, par suite de réactions chimiques. La magnésie et la glucine, par exemple, qui avaient échappé à l'action des piles les plus énergiques, furent réduites par ce moyen.

Davy n'avait songé qu'à décomposer électro-chimiquement les corps ; nous avons montré que l'on pouvait faire jouer un autre rôle à l'électricité, en la faisant servir à la formation de composés insolubles et de substances analogues à celles que l'on trouve dans la nature; il suffisait pour cela d'opérer avec des actions lentes. Cette nouvelle direction donnée à l'électro-chimie date de 1828, et a conduit à l'examen de l'emploi des courants électriques, pour constater la présence de certains corps dans les dissolutions, et même pour les séparer les uns des autres, en mettant à profit leurs propriétés électrochimiques. Elle nous a mis aussi sur la voie d'un procédé pour retirer l'or d'une dissolution contenant de l'or, du cuivre et du plomb, sans toucher aux autres métaux.

Le but de ces diverses recherches a été de jeter les bases de l'électro-chimie, partie des sciences physico-chimiques qui fait concourir l'action de l'électricité dégagée dans les plus faibles réactions chimiques avec celles des affinités, pour augmenter ou diminuer l'énergie de ces dernières, de même que l'on emploie la chaleur pour vaincre la force d'agrégation et provoquer le jeu des affinités dans des circonstances où elles ne se manifestent pas. Sous ce point de vue, l'électro-chimie n'est qu'une annexe de la chimie. Pour s'initier à cette science, il faut faire une étude approfondie des effets électriques produits, 1° dans l'action des liquides et des gaz sur les solides; 2° dans l'action des liquides les uns sur les autres. Cet examen est du même ordre que celui qui concerne le dégagement de la chaleur dans la

combustion ; mais, de même qu'on est parvenu à recueillir la plus grande partie de chaleur produite dans la combustion, de même aussi le physicien doit-il indiquer les moyens simples de recueillir le plus possible de l'électricité dégagée dans les divers modes employés.

En étudiant les actions lentes sous l'influence des forces électriques, on a été conduit à examiner les causes qui exercent une influence sur les actions électro-chimiques en général; ces causes sont nombreuses, et se rapportent en général à l'état des surfaces agissantes. Nous citerons particulièrement l'oxydation, l'hétérogénéité des parties, les propriétés analogues à celles du fer plongé dans l'acide nitrique, qui peuvent rendre certaines parties inattaquables par cet acide, etc., etc.

On a vu qu'il avait été posé en principe que tout ce qui tendait à troubler l'équilibre naturel des molécules était une cause de dégagement de l'électricité. Nous avons dû rechercher si les causes mécaniques, telles que le frottement, la porphyrisation et la désagrégation qui dégagent de l'électricité n'opéraient pas également des changements chimiques dans les corps; et nous avons été ainsi conduit à ce principe, que lorsqu'une substance subit une de ces actions, il y a fréquemment séparation des éléments, et par conséquent décomposition; et nous sommes parvenu ainsi à opérer de doubles décompositions. Un exemple suffira pour donner une idée de ce mode d'action : si l'on broie dans un mortier d'agate un mélange bien sec de carbonate de baryte et de sulfate de soude, on obtient du sulfate de baryte et du carbonate de soude.

L'électricité employée à la reproduction des substances minérales cristallisées et des composés insolubles exigeait des procédés particuliers qui ont été nommés *méthodes des doubles compositions* ou *compositions successives*, et à l'aide desquelles on a pu reproduire des carbonates, des phosphates, des arséniates métalliques, etc.

La cémentation, considérée comme ayant une origine électrique, a été étudiée dans la formation de l'acier, des pseudo-morphoses; nous avons dû nécessairement nous livrer à l'examen de cette question, en recherchant les causes qui interviennent dans l'altération lente des métaux.

Dans tout ce qui vient d'être mentionné, on n'a parlé que de l'électricité agissant comme force chimique sur des substances en dissolution; mais elle peut aussi réagir sur des substances insolubles, comme Davy l'a démontré le premier, et nos recherches à ce sujet

nous ont conduit à des observations intéressantes sur la décomposition des roches.

Les applications de l'électricité à l'étude de quelques phénomènes géologiques ont provoqué des expériences dont les conséquences ont été expliquées différemment; par exemple, on a cru reconnaître des courants électriques dans les filons, et aussitôt on les a considérés comme étant la cause des décompositions lentes et de quelques-uns des changements géologiques qui ont eu lieu à diverses époques, et se produisent encore. Mais nous croyons avoir démontré que les moyens employés pour reconnaître la présence de ces courants n'étaient pas de nature à établir cette vérité, et que la croûte du globe étant composée de roches, qui ne conduisent pas l'électricité, ne pouvait par conséquent être traversée par des courants; et que s'il existait des courants, on ne pouvait les trouver que dans des parties très-restreintes où il y avait des substances métalliques. Le défaut d'habitude dans l'observation des effets électriques produits dans les actions chimiques a dû induire en erreur les observateurs.

L'application de l'électricité, soit à la chimie, soit à la géologie, soit aux arts, exigeait que l'on eût des appareils doués d'une force constante, ou qui, du moins, n'éprouvassent que de faibles variations dans un certain laps de temps.

Les piles à auges étaient loin de remplir ce but, puisqu'elles cessent promptement de fonctionner. Nous avons fait connaître des principes simples, à l'aide desquels on peut construire des appareils voltaïques, à courant constant, qui nous ont servi depuis dix ans à des recherches électro-chimiques. Ce n'est que plusieurs années après que M. Daniell, en se servant du même principe et du même moyen, construisit une pile à courant constant, laquelle, en raison des dispositions qu'elle a reçues, devient un appareil pratique. Depuis, il y a eu beaucoup de variations dans ces dispositions et dans les liquides employés. Avant même les travaux de M. Daniell, nous avions décrit la pile à gaz oxygène, dans laquelle il n'entre que de l'acide nitrique, une solution de potasse caustique, et deux lames de platine communiquant métalliquement ensemble. Cette pile, qui donne un dégagement abondant d'oxygène dans la solution de potasse, sert également d'appareil à courant constant quand on a besoin de courants peu intenses; elle doit la régularité de son action à ce que les lames métalliques ne sont pas polarisées. Pour régulariser encore mieux l'action de la pile à courant constant, on a substitué au zinc le zinc amalgamé, qui possède la propriété de ne pas être attaqué

dans l'eau acidulée. Mais si l'on vient à le toucher avec un fil métallique inattaquable par le liquide, le zinc se dissout, et l'hydrogène se dégage abondamment sur le platine. Cette propriété du zinc amalgamé a été signalée pour la première fois par Davy, dans sa *lecture Backérienne* pour 1826; mais c'est M. Kemp, d'Edimbourg, qui le premier l'a employé dans la construction des appareils voltaïques; MM. Sturgeon et Faraday ont fait aussi des recherches sur cette propriété.

Le principe général que l'on ne doit pas perdre de vue dans l'établissement des piles à courant constant, c'est que les lames employées ne doivent jamais être polarisées de manière à contrarier le courant principal par suite de l'action d'un courant dirigé en sens inverse.

Il ne suffit pas d'avoir une force pour lui faire produire des effets, attendu que ceux-ci sont dépendants de l'intensité de cette force; mais il faut encore avoir les moyens de mesurer exactement cette intensité. Nous avons fait connaître les divers moyens de mesurer avec une grande exactitude les rapports existant entre l'intensité du courant et la déviation de l'aiguille aimantée du multiplicateur. Plusieurs physiciens ont traité la même question à l'égard des courants d'une certaine intensité. Nous citerons particulièrement M. Pouillet, qui a décrit la boussole des tangentes et celle des sinus employées à cet usage.

M. Daniell a fait servir la pile à courant (*Transact. phil.*, 1839) pour rechercher de quelle manière s'opérait la décomposition électro-chimique des composés secondaires; il résulte de ses expériences que l'eau des combinaisons est décomposée en même temps que celles-ci, de telle sorte que la décomposition d'un équivalent d'eau correspond à celle d'un équivalent de cette combinaison, de sorte que, si dans le circuit voltaïque, on place un voltaïmètre renfermant un mélange d'eau et d'acide sulfurique, on recueille la même quantité d'oxygène et d'hydrogène que celle obtenue dans l'autre appareil.

M. Daniell a encore reconnu que, lorsqu'on soumet à l'action décomposante de la pile un mélange d'eau et d'acide sulfurique ou d'un alcali, en partageant en deux parties le vase qui renferme le liquide, au moyen d'un diaphragme de vessie ou autre substance, il y avait transport de l'acide au pôle positif ou de l'alcali au pôle négatif, en même temps que l'eau était décomposée, résultats qui proviennent de la décomposition électro-chimique de la combinaison de l'eau avec l'acide ou l'alcali.

M. Harris ayant trouvé quelques inconvénients dans la construc-

tion et l'emploi de la balance de torsion, a repris, à l'aide de la balance bifile, les expériences de Coulomb relatives à la détermination des lois de l'attraction et de la répulsion des forces électriques; il s'est attaché surtout à montrer que ces lois n'ont pas toutes la généralité qu'on leur suppose. Mais hâtons-nous d'annoncer que tout en reconnaissant que les résultats qu'il a obtenus étaient quelquefois en plein désaccord avec la grande découverte de Coulomb, il a démontré que ces résultats pouvaient rentrer dans ces lois, en ayant égard aux actions par influence qui ont lieu entre deux corps électrisés placés à petite distance. La loi de Coulomb n'est donc masquée dans ce cas que par un effet d'induction ; au surplus, elle a été tellement bien établie par de nombreuses expériences et par les travaux analytiques de M. Poisson, qu'elle est à l'abri de toute attaque.

On doit également à M. Harris des expériences intéressantes sur les circonstances qui accompagnent la décharge électrique entre deux conducteurs, et dont nous ne pouvons rendre compte ici; nous citerons néanmoins les lois principales qu'il a obtenues.

1° *Les quantités respectives d'électricité de nature contraire, nécessaires pour traverser un intervalle donné, varient dans un simple rapport avec la densité de l'air.*

2° *Quand la densité est moitié, la décharge a lieu avec la moitié de la quantité accumulée, c'est-à-dire, avec un quart de l'intensité ou action libre.*

3° *La distance à laquelle peut se décharger une accumulation donnée est dans un simple rapport avec la densité de l'air.*

M. Faraday, auquel on doit un si grand nombre de découvertes importantes en électro-chimie, a cherché à déterminer le pouvoir inducteur des substances isolantes. On sait que quand on interpose un corps isolant entre un corps électrisé, et un autre qui ne l'est pas, le premier exerce sur celui-ci, malgré le corps interposé, une action inductive ou par influence. Mais de quelle manière intervient le corps isolant intermédiaire ? diminue-t-il l'action, et dans quel rapport, suivant la nature du corps? Telles sont les questions que le physicien anglais s'est proposé de résoudre. Il a commencé par déterminer le pouvoir inducteur pour le gaz acide carbonique, l'hydrogène, l'essence de térébenthine, la laque, le soufre et le verre, et il a déduit de ses expériences, ce que, du reste, l'on admettait déjà, que l'induction s'opère de la même manière que la propagation du fluide électrique dans les corps conducteurs, avec cette différence néanmoins que dans le pre-

mier cas il n'y a pas transmission, tandis que dans le second cette transmission a lieu.

M. Faraday, désirant rattacher les phénomènes électriques à quelques principes généraux, a étudié avec de grands développements les rapports existant entre l'induction, la conductibilité et les diverses décharges électriques. Ce travail a une telle étendue, que nous ne pouvons que le mentionner ici. On le trouve exposé avec de grands développements dans le cinquième volume de notre ouvrage; mais une des découvertes les plus importantes de M. Faraday, en électro-chimie, est, sans aucun doute, celle de l'action chimique définie de l'électricité, dont il sera question plus loin.

L'action de l'électricité voltaïque sur les matières organiques a été étudiée dans ces dernières années avec soin, particulièrement sur l'alcool et l'éther. Nous citerons en première ligne M. Arthur Connel, qui a reconnu que dans l'alcool l'eau seule subit l'action décomposante, que l'hydrogène se dégage au pôle négatif, et que l'oxygène donne naissance, par son action secondaire, à des composés qui se dissolvent dans l'alcool ou se précipitent; il a conclu de là que l'alcool absolu devait renfermer de l'eau comme principe constituant; or, comme l'éther, dans les mêmes circonstances, n'éprouve pas l'action décomposante du courant, M. Connel en a inféré que l'éther ne renferme pas d'eau au nombre de ses principes constituants.

M. Ed. Becquerel a commencé, en 1839, une série de recherches pour étudier les effets électro-chimiques produits dans les changements chimiques opérés dans les corps sous l'influence de la lumière, particulièrement dans la décomposition du bromure, du chlorure, de l'iodure d'argent; les résultats auxquels il a été conduit rentrent dans les principes généraux dont on a parlé précédemment. A l'aide d'un instrument qu'il a nommé *actinomètre électro-chimique*, il a déterminé avec exactitude l'intensité de l'action chimique de chaque partie du spectre solaire; ces expériences sont d'autant plus importantes qu'elles l'ont mis à même de résoudre la question du contact de la manière suivante:

Lorsqu'une substance agit sur une autre sous l'influence de la lumière, il se produit des effets électriques, comme dans toute réaction chimique, lesquels se manifestent tant que persiste cette influence. Quand celle-ci cesse, il n'y a plus aucun signe d'électricité, et cependant le contact des substances nouvellement formées avec les lames métalliques subsiste toujours, et rien n'est changé dans le circuit. On peut donc déduire de ce qui précède *qu'un contact qui n'est*

pas suivi d'une action chimique ne saurait troubler l'équilibre des forces électriques. Nous le répétons, on ne pouvait résoudre la question qu'à l'aide de la lumière qui permet de faire naître et disparaître à volonté l'action chimique sans détruire le contact, condition qui ne peut être remplie avec les agents chimiques ordinaires.

On lui doit encore des observations sur les effets électriques produits par le contact de deux dissolutions différentes superposées sous l'influence de la lumière; les résultats obtenus montrent, par exemple, que les effets électriques, dans la réaction de deux dissolutions l'une sur l'autre, se compliquent d'effets électro-chimiques particuliers, résultant de la réaction de la lumière sur les lames de platine et les liquides environnants, réaction qui n'est pas calorifique et dont la nature nous est inconnue. Ce genre de recherches ne peut manquer de conduire à des résultats importants touchant l'action chimique de la lumière sur les corps. Il a encore examiné l'influence qu'exercent les corps dissous dans l'eau sur la décomposition électro-chimique de celle-ci, et en a déduit un moyen simple qu'on pourra employer pour comparer entre elles les affinités.

A l'époque actuelle, les recherches sur l'électricité ayant reçu de grands développements, il n'est pas étonnant que toutes les branches dont se compose cette partie de la physique soient cultivées en même temps; aussi sommes-nous obligé de rapporter successivement dans cette notice des faits qui ont peu de rapports entre eux. Ainsi le lecteur nous pardonnera de changer fréquemment de sujet. Dans ces derniers temps, on a observé un dégagement considérable d'électricité dans un jet de vapeur sortant d'une chaudière. M. Armstrong (*Ph. mag., nov.* 1840) est le premier qui ait observé ce fait, lequel a été étudié ensuite par M. Schafthœult (*Ph. mag., fev.* 1841), M. Peltier et plusieurs autres physiciens. Toutes les expériences entreprises dans le but de remonter à la cause du phénomène tendent à prouver, en raison des résultats obtenus, qu'il rentre dans les effets électriques produits pendant la volatilisation de l'eau tenant un sel en dissolution; car il n'a lieu qu'autant que l'eau de la chaudière à vapeur renferme un sel quelconque et qu'il se forme un encroûtement; mais ce qui complique singulièrement le phénomène, ce sont les effets produits: 1° dans l'action chimique du liquide sur la fonte; 2° dans la séparation de l'eau des substances qu'elle tient en dissolution; et dans des actions calorifiques dont la cause n'est pas encore bien connue.

D'après cela, il n'est pas étonnant qu'on n'ait pas encore donné

une explication complétement satisfaisante du fait principal dans les diverses circonstances où il a été observé.

Parmi les applications qui attirent l'attention dans ce moment, il y en a quatre principales : le traitement électro-chimique des minerais d'argent, de cuivre et de plomb, la galvano-plastique, la dorure, et enfin la télégraphie.

Le traitement électro-chimique des métaux nous a occupé depuis cinq ans. Cette question, importante pour les arts, était hérissée de difficultés qui n'ont pu être surmontées que par le temps, la patience et des dépenses assez considérables; car il ne suffisait pas de réussir dans le laboratoire, il fallait encore opérer en grand. C'est ce motif qui nous a engagé, aidé de quelques industriels, à construire une usine d'essai dans laquelle on pût traiter plusieurs milliers de kilogrammes de minerai d'argent avec un succès tel que l'on peut espérer que ce mode de traitement sera employé dès que l'on sera parvenu à vaincre la défaveur qui accompagne toujours les nouveaux procédés.

La galvano-plastique n'est qu'une application des procédés dont nous nous servons depuis longtemps, soit pour former des substances insolubles, soit pour le traitement des minerais. On s'est disputé l'honneur de cette application; mais M. Jacobi est le premier qui ait fait l'application de nos principes à la galvano-plastique. Il a annoncé en effet dans une lettre à M. Faraday, antérieure à toute autre publication, qu'il était parvenu à avoir des copies en relief et en creux avec une planche de cuivre gravée, avec une exactitude telle que les lignes les plus délicates étaient reproduites avec une rare perfection. Depuis, ce nouvel art a été perfectionné, et aujourd'hui on peut obtenir non-seulement des bas-reliefs d'une grande dimension, mais encore des statues. La galvano-plastique, quoique pouvant avoir de l'importance, en aura cependant moins que la dorure électro-chimique dont les applications sont usuelles.

M. de la Rive est le premier qui ait songé et ait réalisé l'idée d'appliquer l'or sur les métaux, en faisant usage de nos appareils électro-chimiques simples. Mais quoiqu'il ait obtenu une bonne dorure, cependant elle ne satisfaisait pas aux exigences de l'industrie. La dissolution dont il faisait usage ne le lui permettait pas. M. Elkington avança cet art en indiquant plusieurs dissolutions, les aurates alcalins et les doubles cyanures, et faisant usage de l'action de plusieurs couples voltaïques. M. de Ruolz a repris la question; et de tous ceux qui s'en sont occupés, il est celui qui ait obtenu les meilleures disso-

lutions, non-seulement pour l'application de l'or sur l'argent, le cuivre, mais encore pour celle d'un métal sur un autre. Les pièces qu'il a obtenues paraissent réunir les conditions de solidité et de beauté exigées dans les arts. En analysant les effets produits, nous avons montré qu'à l'aide des actions lentes produites par les appareils simples, on obtenait d'excellentes dorures, adhérant fortement aux métaux, et que l'on pouvait dorer parfaitement le filigrane. Nous avons montré en même temps que les actions lentes étaient préférables aux actions rapides.

L'application de la télégraphie à l'électricité occupe les physiciens depuis au moins quarante ans; mais toutes les tentatives avaient été infructueuses; aussi n'en ferons-nous pas mention. M. Wheatstone est le premier qui ait montré la possibilité de transmettre, à de grandes distances, des mots, des phrases, avec simplicité et économie; il a fait des expériences avec succès sur des distances de près de vingt milles. MM. Gauss et Weber se sont occupés du même sujet. Leurs premières expériences ont été mentionnées dans les *Publications scientifiques de Gœttingue* pour 1834, et dans *l'Annuaire de Schumaker* pour 1836. La seule difficulté de ce mode de transmission de la pensée à de grandes distances, est l'établissement d'un conducteur à l'abri de la malveillance. On avait pensé à se servir des rails des chemins de fer; mais on a bientôt reconnu que la mauvaise conductibilité de la fonte et les solutions nombreuses de continuité étaient un obstacle. La question en est là aujourd'hui.

La phosphorescence, depuis une dizaine d'années, a été étudiée dans ses rapports avec l'électricité; une origine électrique ne saurait lui être aujourd'hui refusée. En effet, il est démontré que le dégagement du fluide électrique a lieu toutes les fois que les molécules des corps éprouvent un dérangement quelconque, soit dans leur constitution, soit dans leur groupement. Ce dégagement étant toujours accompagné d'une recomposition des deux fluides, qui peut être suivie, selon la nature des corps et la tension de l'électricité, d'une émission de lumière et de chaleur, même lorsque les molécules ne sont pas séparées, il doit en résulter que lorsque ces molécules sont ébranlées ou séparées par la percussion, la chaleur, l'action chimique ou le choc électrique, il peut y avoir également émission de lumière. Or, comme ces causes sont précisément celles qui produisent la phosphorescence, on est naturellement porté à en inférer que la phosphorescence ait une origine électrique.

Les recherches dans le but d'établir l'origine électrique de la phosphorescence nous ont amené à étudier la nature de la radiation émanée de l'étincelle électrique qui excite la phosphorescence à distance. Les expériences ont prouvé que la lumière électrique possède des rayons particuliers différents de ceux qui produisent la sensation de la lumière, et en vertu desquels est produite la phosphorescence. Ainsi, la lumière qui a des radiations lumineuses, des radiations calorifiques, des radiations chimiques, a également des radiations phosphorogéniques.

Les aurores boréales ont été le sujet d'observations suivies, eu égard à leur action sur l'aiguille aimantée. Il résulte d'une foule d'observations faites en divers points du globe, que les aurores boréales réagissent sur l'aiguille, non-seulement dans les lieux où elles sont visibles, mais encore dans des contrées qui en sont éloignées; de sorte qu'il n'est plus permis de douter qu'elles n'aient une origine électrique, quoiqu'on ignore encore quelle peut être la source de cette énorme quantité d'électricité qui se trouve fréquemment accumulée dans les régions supérieures à notre atmosphère. Avant ces données, on n'avait que les faits suivants pour attribuer à l'aurore boréale une origine électrique : l'électricité qui passe dans le vide s'y montre sous les mêmes apparences lumineuses que celles observées dans l'aurore boréale; l'air, devenant moins dense à mesure qu'il s'élève au-dessus de la surface de la terre, les décharges électriques qui ont lieu dans les régions supérieures devaient présenter les mêmes apparences que dans des tubes remplis d'air plus ou moins raréfié. Aujourd'hui nous avons de plus les phénomènes magnétiques qui sont d'un grand poids dans la question.

Les trombes ont été envisagées également sous le rapport électrique. M. Peltier a cherché à démontrer que tous les effets de ce météore peuvent être expliqués au moyen des phénomènes électriques; le travail qu'il a fait à ce sujet, et dont j'exposerai les principaux résultats en traitant de la météorologie, se rattache à la manière dont il envisage les phénomènes de l'atmosphère, et en particulier ceux relatifs à l'électricité.

Les théories électro-chimiques qui ont été successivement mises en avant pour établir les rapports existant entre les affinités et les forces électriques, ne comprenaient qu'un nombre assez restreint de faits; aussi avaient-elles besoin d'être modifiées pour embrasser toutes les observations dont la science s'est enrichie depuis quelques années. Pour jeter les bases d'une bonne théorie, il fallait prendre en consi-

dération les effets électriques qui accompagnent les combinaisons et les décompositions chimiques.

L'action des particules hetérogènes, les unes sur les autres, et la permanence de leur union sont-elles dues à des forces électriques, ou à des forces dont la natnre nous est inconnue? Quelque disposé que l'on soit à répondre affirmativement à la première question, nous devons néanmoins nous borner à dire que les faits nombreux qui surgissent de toutes parts tendent à établir : 1° qu'il existe des rapports intimes entre les affinités et les forces électriques, rapports qui doivent servir de base à toute théorie électro-chimique ;

2° Que les deux principes existent dans les interstices des molécules à l'état d'électricité naturelle ; qu'ils en sont expulsés en même temps que la chaleur qui s'y trouve, par l'effet d'actions mécaniques ou chimiques ; que l'état électrique des corps modifie sans cesse les affinités ;

3° Qu'il existe une quantité énorme d'électricité naturelle dans les espaces moléculaires où s'opèrent les phénomènes les plus mystérieux de la nature, quantité tellement identifiée aux forces qui unissent les molécules, que l'on détruit ou que l'on affaiblit l'action de ces forces quand on enlève tout ou partie de cette électricité ; si donc elle ne constitue pas les affinités et la force d'agrégation, elle est du moins indispensable à leur existence.

4° L'hypothèse ancienne, que la chaleur est formée de la réunion des deux électricités, subsiste toujours, et repose sur des faits de plus en plus concluants ; on n'a encore trouvé que peu d'exceptions qui puissent l'infirmer.

5° L'électricité produite dans les actions chimiques n'est qu'un effet résultant de l'action des affinités ; elle reparaît, mais en sens inverse, dans la décomposition. Ces deux effets annoncent un état électrique moléculaire indispensable à la permanence de l'union des particules hétérogènes dans la combinaison, ou des molécules similaires dans la constitution des corps.

Il existe un accord parfait entre la théorie des proportions définies et celle de l'affinité électro-chimique, puisqu'il est prouvé maintenant, d'après les observations de M. Faraday, que les parties équivalentes des corps contiennent d'égales quantités d'électricité. Ainsi, les atomes qui sont équivalents les uns aux autres, possèdent des quantités égales d'électricité.

Le pouvoir des masses dans la décomposition électro-chimique des sels en dissolution se fait également sentir ; mais il est soumis à des lois très-complexes qui dépendent des quantités relatives de ces sels,

de la quantité du dissolvant et de l'intensité du courant. Les résultats que nous avons déjà obtenus à cet égard pourront servir à faire connaître les rapports existant entre les affinités de deux bases pour un acide, ou d'une base pour deux acides.

Parmi les physiciens qui s'occupent de l'électro-chimie, nous devons citer M. Matteucci, auquel on doit des recherches sur les sujets suivants :

1° Sur les effets produits dans le contact des gaz et des métaux non oxydables; 2° sur la force chimique du courant électrique, et ses rapports avec le mode de combinaison des corps décomposés ; 3° sur la décomposition voltaïque opérée simultanément sur deux combinaisons mêlées ensemble, sur des combinaisons binaires du second ordre ; 4° sur le rapport qui existe entre l'action chimique du courant et le nombre relatif des équivalents chimiques qui entrent dans la combinaison chimique des composés. Enfin, il est l'auteur de recherches pleines d'intérêt sur le courant propre de la grenouille, sur les causes qui le modifient, et sur celles qui le produisent et ne sont pas encore bien connues.

Ces résultats généraux ne suffisent pas pour en tirer la conséquence que les affinités soient dues à des forces électriques, et réciproquement ; tout ce que l'on en peut conclure, c'est que les affinités et les forces électriques se manifestent toujours ensemble, et que l'on peut, à volonté, se servir des affinités pour produire les forces électriques, et *vice versâ*. Dès lors, le chimiste ne saurait, à l'époque actuelle, se dispenser de prendre en considération les effets électriques produits dans les actions chimiques, s'il veut concourir à l'avancement des sciences physico-chimiques, qui ne peuvent qu'étendre le domaine de la chimie.

On a pu voir que nous avons cherché à esquisser à grands traits la marche que l'électricité a suivie depuis le commencement du siècle dernier jusqu'à cette époque, en nous attachant particulièrement aux phénomènes généraux et glissant légèrement sur les questions de détail; il y a même quelques travaux intéressants que nous n'avons fait qu'indiquer, et sur lesquels nous reviendrons dans le cours de cet ouvrage.

Lorsque l'on cherche à se rendre compte des causes qui ont concouru à l'avancement de l'électricité, on ne peut s'empêcher de reconnaître qu'il y a quatre périodes pendant chacune desquelles cette partie de la physique a reçu une certaine impulsion, conséquence de la découverte qui caractérise cette époque.

Première période. Depuis les temps les plus anciens où l'on ne connaissait que le pouvoir attractif de l'ambre et de quelques substances, jusqu'à la découverte des deux électricités.

Deuxième période, comprenant tout ce qui a été trouvé depuis la fin de la première période jusqu'à la découverte de la pile.

Troisième période, comprenant tout ce qui a été découvert depuis la pile jusqu'à l'électro-magnétisme, par conséquent tous les travaux exécutés avec cet admirable appareil fonctionnant comme puissance chimique, calorifique et mécanique.

Quatrième période. Elle commence à la découverte d'OErsted, et se termine à notre époque. Cette découverte a eu pour conséquences : la détermination des lois qui régissent les attractions et répulsions des courants électriques; l'analyse des effets électriques produits dans les actions chimiques, et de l'action définie de l'électricité; la construction de la pile à courant constant, sans laquelle les forces électriques ne pouvaient être appliquées aux besoins des arts et de l'industrie; enfin, la substitution de l'électricité à petite tension à l'électricité à forte tension, non-seulement pour décomposer les corps, mais encore pour les recomposer, ce que l'on ne pouvait faire avec la pile ordinaire; l'application de l'électricité au traitement des métaux, à la galvano-plastique, à la dorure, à la télégraphie, aux machines comme force motrice.

L'impulsion donnée à l'électricité dans cette période est telle, qu'on ne peut savoir où elle s'arrêtera et quelles en seront un jour les conséquences pour la physique, la chimie et les sciences naturelles.

CHAPITRE V.

DU MAGNÉTISME.

Historique et propriétés générales.

Un courant électrique qui parcourt un fil de métal recouvert de soie et enroulé en hélice y développe comme on sait des propriétés que nous retrouvons dans un minerai de fer appelé par les anciens pierre d'aimant, parce qu'elle attirait les parcelles de fer placées à peu de distance.

Pline rapporte à ce sujet que Dinocarès proposa à Ptolémée Philadelphe de bâtir à Alexandrie un temple dont la voûte, garnie de pierres d'aimant, soutiendrait en l'air une statue en fer de la reine Arsinoë. Saint Augustin fait également mention d'une statue suspendue au milieu du temple de Sérapis à Alexandrie. Les propriétés attractives de l'aimant frappèrent tellement les anciens qu'ils allèrent jusqu'à lui supposer des vertus médicinales : Hippocrate lui-même rangea cette substance au nombre des purgatifs. Il paraît que les Chinois avaient des connaissances plus étendues que les Grecs et les Romains sur les propriétés de l'aimant naturel et artificiel ; car on prétend que, plusieurs siècles avant l'ère chrétienne, ils savaient qu'une aiguille aimantée, librement suspendue, se dirigeait vers les mêmes points de l'espace, c'est-à-dire, sensiblement du nord au sud. Duhalde rapporte, en effet, dans sa *Description de l'empire de la Chine*, que l'on employait la boussole dans les voyages sur terre plus de mille ans avant Jésus-Christ.

Mais, sans ajouter foi aux documents de Duhalde, nous dirons que dans un poëme manuscrit du XIIe siècle, qui se trouve à la Bibliothèque royale, et que l'on attribue à un certain Guyot de Provins, il y est fait mention de la boussole, sous le nom de *marinière*. Le cardinal Jacques de Vitri, qui vivait vers l'an 1200, parle de l'aiguille aimantée dans son *Histoire hiérosolymitaine ;* il dit même qu'elle était nécessaire et indispensable aux navigateurs. On a dit aussi que cette invention avait été rapportée de la Chine par Marco Paolo, célèbre voyageur qui était revenu de ces contrées en Europe vers 1295 ; cependant, il n'en est pas fait mention dans la relation qu'il a donnée de son voyage. Ce qu'il y a de plus certain, c'est que, dès 1497, Vasco de Gama, navigateur portugais, fit usage de la boussole lors de ses premières expéditions dans l'Inde. Tels sont les documents qu'on a pu recueillir jusqu'ici pour remonter à l'origine de la boussole, sans qu'on soit encore parvenu à trouver le nom de celui qui a fait une aussi grande découverte.

Dans le principe, on croyait que l'aiguille aimantée se dirigeait toujours vers le nord ; mais on fut bientôt détrompé. Colomb, qui était à la recherche du nouveau monde, en 1492, observa que la direction de l'aiguille n'était pas constante. Thévenot assure, dans ses *Voyages*, avoir vu une lettre de Pierre Adzige, écrite en 1269, plus de deux cents ans par conséquent avant Colomb, dans laquelle on disait que l'aiguille aimantée déclinait de 5°.

Un manuscrit d'un pilote de Dieppe, nommé Grignon, et dédié à

Sébastien Chabot, en 1534, fait également mention de la déclinaison de l'aiguille aimantée. Néanmoins, on fait honneur de la découverte de la déclinaison à Chabot lui-même, à Gonzalès et à quelques autres. Quoi qu'il en soit, la propriété dont jouit l'aiguille aimantée de s'écarter plus ou moins dans chaque lieu, à droite ou à gauche du méridien de ce lieu, était très-connue dans le XVIe siècle. Les plus anciennes observations un peu exactes sur la déclinaison commencèrent à Paris en 1550; à cette époque, la déclinaison était vers l'est; elle est devenue nulle en 1663, puis elle est repassée à l'ouest en augmentant successivement, et, depuis quelques années, sa marche est décroissante.

En 1599, les navigateurs hollandais dressèrent des tables de déclinaison qui étaient assez exactes pour l'époque; depuis, on en a formé de nouvelles, dont nous parlerons en exposant le magnétisme terrestre. En 1576, Robert Normann, ingénieur en instruments de physique, à Londres, découvrit une autre variation dans la marche de l'aiguille aimantée.

On avait eu souvent l'occasion de remarquer que l'aiguille perdait son horizontalité à mesure qu'on l'approchait du nord, et que son pôle austral s'abaissait au-dessous de l'horizon. Comme on ne savait à quelle cause attribuer cet effet, on supposa que l'aiguille n'était pas suspendue par son centre de gravité. Robert Norman ayant placé un contre-poids pour rétablir l'horizontalité, s'aperçut qu'il fallait le changer d'un lieu à un autre, et fut conduit ainsi à la découverte de l'inclinaison. On ne tarda pas à reconnaître que, pour observer complétement ce phénomène, il fallait que l'aiguille fût libre de se mouvoir dans le plan du méridien magnétique, condition que l'on obtient en la suspendant par son milieu à un axe perpendiculaire à ce plan. Quand l'aiguille n'est pas aimantée, elle reste dans une direction horizontale; aussitôt qu'on lui communique du magnétisme, elle se dévie de cette direction d'un certain nombre de degrés. On a nommé *angle d'inclinaison* celui qui mesure cette déviation.

Les aimants jouissent de propriétés qui ont été étudiées avec d'autant plus de soin qu'elles concernent également l'aiguille aimantée de la boussole, qui a déjà rendu d'immenses services à la civilisation. Nous allons rapporter succinctement ces propriétés.

Les aimants non-seulement attirent le fer doux, mais ils le transforment encore en un véritable aimant tant qu'il se trouve dans leur sphère d'activité; en retirant l'aimant, le fer rentre dans son état naturel, à moins qu'il n'ait été préalablement tordu, limé, tourmenté

d'une manière quelconque, ou bien qu'il n'ait été combiné avec le carbone et trempé, cas où il devient acier ; car il conserve alors le magnétisme qu'il a acquis par influence ou par frottement. Un barreau d'acier ainsi aimanté est appelé *barreau aimanté*. En projetant de la limaille de fer sur une feuille de papier placée au-dessus d'un barreau aimanté, on reconnait que tous les points ne possèdent pas la même puissance attractive; que vers les extrémités, les parcelles de limaille, réunies par l'action magnétique, sont plus longues qu'ailleurs, et placées perpendiculairement à la surface, tandis qu'elles deviennent plus courtes à mesure qu'on s'approche du milieu où aucune n'adhère. On a nommé *pôles* les deux points où les parcelles de limaille se réunissent en une infinité de petits filaments parallèles entre eux. Il résulte de ce fait et des précédents que, dans chaque moitié d'un aimant, il existe une force identique, égale, dirigée en sens contraire, et jouissant de propriétés opposées, de telle sorte qu'un côté attire le bout d'un aimant et repousse l'autre. En brisant le barreau aimanté, chacune des parties devient un nouvel aimant, et possède également deux pôles. Dans l'action par influence d'un aimant sur l'acier, l'effet est très-faible; mais il augmente par le contact, et encore plus par le frottement. L'acier devient alors un véritable aimant. Un barreau qui sert à en aimanter un autre ne perdant pas de sa force, on en a conclu que le fluide magnétique, pendant l'aimantation, ne passait pas de l'aimant dans le fer, comme dans l'électrisation d'un corps par contact; que l'aimantation avait pour but de séparer dans la même molécule les deux fluides magnétiques qui, par leur réunion, forment le fluide neutre; fluides qui jouissent de cette propriété sous l'influence des variations atmosphériques; que ceux de même nom se repoussent et ceux de nom contraire s'attirent. La force qui s'oppose dans l'acier à la séparation des deux fluides, et par suite à leur recomposition, a reçu le nom de *force coercitive*, laquelle varie dans les différents aciers, et même dans chaque acier, suivant le degré de la trempe et de la température.

Le fer peut également s'aimanter par l'action du magnétisme terrestre, puisque le globe est un véritable aimant. Gilbert, qui écrivait vers le XVIe siècle, rapporte que cette observation fut faite pour la première fois sur la tige de la girouette des Augustins à Mantoue. On a attribué aussi cette observation à Gassendi. Quel qu'en soit l'auteur, Gilbert est le premier qui ait donné la théorie de ce phénomène.

Le fer n'est pas le seul métal qui jouisse de la propriété magnétique; le nickel, le cobalt et même d'autres métaux, dit-on, la possèdent

également : c'est une question que nous aurons l'occasion d'examiner plus loin.

En cherchant la position des pôles d'une aiguille aimantée, on a reconnu qu'elle en possédait quelquefois plusieurs. On a donné le nom de *points conséquents* à ces pôles intermédiaires. Les aiguilles qui ont de semblables pôles ne peuvent être d'aucune utilité dans les recherches relatives au magnétisme terrestre.

Une question qui est fondamentale pour la théorie du magnétisme, a dû occuper les physiciens dès l'instant que les phénomènes magnétiques eurent pris un certain développement; nous voulons parler des lois qui régissent les attractions et répulsions magnétiques; cette question n'a été résolue qu'en 1789, époque à laquelle Coulomb fit connaître deux méthodes pour mesurer avec précision l'intensité des forces magnétiques; l'une est celle des oscillations; l'autre consiste à comparer l'action magnétique à la force de torsion du fil de la balance dite *de torsion*, semblable à celle dont il avait fait usage pour mesurer les attractions et répulsions électriques. Par ces deux méthodes, Coulomb démontra que les attractions et répulsions magnétiques avaient également lieu en raison directe de la densité du fluide et en raison inverse du carré de la distance. Il s'occupa en même temps de la distribution du magnétisme dans les aimants de diverse forme et de la détermination des pôles, et parvint ainsi à ce résultat, que dans les aimants au-dessus de 162 à 216 millimètres de longueur, dont les dimensions transversales étaient égales, mais très-petites relativement à la longueur, les pôles se trouvaient toujours à même distance, c'est-à-dire, à environ 40 millimètres des extrémités, et que, dans des aimants très-courts, ces points étaient situés au tiers de la demi-longueur, limite dont les pôles s'approchent sans cesse à mesure que les aimants deviennent de plus en plus petits.

Dès que l'on eut reconnu qu'un barreau d'acier trempé était susceptible de s'aimanter par le frottement d'un des pôles d'un aimant naturel, on dut rechercher les moyens les plus efficaces pour donner au barreau le maximum d'intensité magnétique. Pendant longtemps on se borna à passer l'extrémité d'un aimant sur toute la longueur du barreau d'acier; on reconnut que cette méthode ne pouvait servir qu'à aimanter des aiguilles courtes et d'une petite dimension, en raison de l'inconvénient qu'elle présentait de donner des points conséquents. En 1745, on commença à perfectionner cette méthode: Knight mit, sur l'aiguille qu'il voulait aimanter, deux barreaux fortement aimantés bout à bout sur la même ligne, les pôles inverses

en regard, moitié d'un côté, moitié de l'autre de l'aiguille. En retirant ces barreaux avec frottement, dans le sens de leur longueur, l'aiguille acquérait un plus fort magnétisme que par la méthode de la simple touche, c'est-à-dire, par le frottement d'un simple barreau. Duhamel ajouta un perfectionnement à cette méthode; après avoir placé le barreau à aimanter entre deux barres de fer doux, il prit deux autres barreaux aimantés qu'il inclina de 25 à 30°, les pôles inverses en regard, et fit glisser ceux-ci sur chacune des moitiés du barreau, en se rendant vers les extrémités. Cette méthode, nommée *touche séparée*, est reconnue la meilleure pour aimanter le plus complétement possible les aiguilles de boussole. Mitchell apporta une modification à ce procédé. Il mit en contact plusieurs barreaux d'acier, et promena, sur leurs surfaces, deux faisceaux de barreaux aimantés, dans une direction perpendiculaire, les pôles inverses en regard et à une distance constante. Œpinus perfectionna ce procédé et montra, en 1758, l'avantage qu'il y avait à se servir de barreaux fixes. A cet effet, il plaça les barreaux d'acier entre de forts aimants, et inclina dessus les aimants mobiles en les maintenant à une distance fixe; on aimante ainsi de forts barreaux; mais cette méthode donne lieu souvent à des points conséquents. Il ne suffisait pas d'aimanter des barreaux d'acier à saturation, il fallait encore déterminer la distribution du magnétisme libre dans chacune des moitiés du barreau : c'est ce que fit Coulomb, par une méthode qui exige l'emploi de la balance magnétique. On place, à l'extrémité du fil de suspension, un fil d'acier aimanté à saturation, on présente successivement à son extrémité tous les points du barreau dans lequel on veut determiner la distribution du magnétisme. Au moyen d'un calcul très-simple, on déduit l'intensité magnétique de chaque point. C'est ainsi que Coulomb parvint à reconnaître que le magnétisme libre est réuni presque en entier sur les huit premiers centimètres du fil, à partir des extrémités. On conçoit qu'il m'est impossible d'entrer ici dans aucun détail d'expérience; on peut consulter, à cet égard, mon *Traité d'électricité et du magnétisme*, t. II, p. 306 et suiv., ainsi que pour plusieurs questions qui s'y rapportent. Nous citerons particulièrement les recherches de Coulomb sur la forme, les dimensions et la trempe que l'on doit donner aux barreaux et aux aiguilles, suivant les effets que l'on veut étudier. Telles sont les propriétés générales des aimants; nous allons en rapporter d'autres qu'il est indispensable de connaître pour se livrer à l'étude du magnétisme terrestre. Commençons par l'action du globe sur les aiguilles aimantées.

Cette action est étudiée au moyen de boussoles dont nous ne pouvons donner ici la construction; nous dirons seulement que leur forme varie suivant les effets que l'on veut produire. C'est ainsi qu'il y a une boussole de déclinaison, une boussole d'inclinaison, et une boussole des intensités.

La déclinaison est dite *orientale*, *nulle* ou *occidentale*, selon que le méridien magnétique ou le plan qui renferme l'aiguille est à l'orient du méridien terrestre, coïncide avec lui ou est à l'occident. On a nommé *pôle boréal* d'une aiguille celui qui regarde le nord, et *pôle austral* celui qui regarde le sud; mais en réalité le premier possède le fluide austral, et le second le fluide boréal.

La direction de la résultante des forces magnétiques du globe est donnée par l'aiguille de la boussole de déclinaison et par celle de la boussole d'inclinaison. Les points d'application des deux composantes et leur intensité sont déterminés par des procédés particuliers. En effet, supposons une aiguille aimantée, librement suspendue, et n'obéissant qu'à l'action du magnétisme terrestre, et considérons un élément quelconque de cette aiguille, suffisamment petit, pour qu'il ait un état magnétique uniforme, et qu'il possède par exemple une petite quantité de magnétisme boréal libre, cet élément sera repoussé par les forces boréales de tous les points de la terre, et attiré par les forces australes avec une énergie proportionnée à cette quantité de magnétisme. L'action de toutes ces forces sur l'élément pourra être remplacée par celle de deux autres forces égales et dirigées en sens contraire. Il en sera de même pour un autre élément. Mais comme les points d'application de ces résultantes partielles sont situés à une distance infinie, relativement aux dimensions de l'aiguille, les directions de ces résultantes seront nécessairement parallèles entre elles; la question se trouve donc ramenée à la détermination de la résultante et de son point d'application, de forces parallèles qui forment deux systèmes, l'un composé de forces agissant dans un sens sur tous les points de l'une des moitiés de l'aiguille, et l'autre composé de forces agissant dans un autre sens sur tous les points de l'autre moitié. Or, les principes de statique relatifs à l'équilibre des corps sollicités par des forces parallèles nous indiquent que la résultante doit être parallèle aux composantes. Il en résulte que l'action du magnétisme terrestre sur une aiguille aimantée peut être représentée par deux forces égales parallèles et dirigées en sens contraire, dont les points d'application se trouvent de chaque côté du point de suspension de l'aiguille, à égale distance des extrémités. Ces points d'appli-

cation ne peuvent être déterminés que lorsque l'on connait la distribution du magnétisme libre dans chacune des deux moitiés de l'aiguille.

Nous ne pouvons indiquer ici la méthode pour déterminer la position de ces points et celle de la ligne qui les joint. Quant à la détermination de l'intensité de la résultante des forces magnétiques terrestres, on suppose que chacune des résultantes partielles soit décomposée en deux autres, l'une dans le sens de l'aiguille de déclinaison, et l'autre perpendiculaire à sa direction. Les deux forces perpendiculaires ne peuvent imprimer aucun mouvement à cette aiguille, tandis que les deux autres, agissant dans la direction de l'aiguille en sens contraire, la ramènent continuellement dans le plan du méridien magnétique, lorsqu'on l'en écarte, avec une vitesse dépendante de la force du magnétisme terrestre et du magnétisme libre de l'aiguille. Cette vitesse est mesurée par le nombre d'oscillations exécutées dans un temps donné. L'aiguille se comporte donc comme un pendule par rapport à la pesanteur. En faisant osciller l'aiguille en divers points du globe, les forces qui ont successivement agi sont entre elles comme les carrés des nombres d'oscillations exécutées dans le même temps. La différence des carrés donne celle des intensités; telle est la méthode générale employée pour déterminer la résultante des forces magnétiques du globe en direction et en intensité. Mais il faut admettre pour cela que les aiguilles conservent toujours leur magnétisme libre, et que les variations de température n'apportent aucun changement. Or, il n'en est pas ainsi; c'est pour ce motif que l'on a étudié l'influence de la chaleur sur les propriétés magnétiques du fer, de l'acier et des aimants. Cette question a occupé successivement Newton, le P. Kircher, Cavallo, Coulomb, MM. Scoresby, Barlow, Kupffer, etc.

Sans entrer dans les détails d'expériences et sans faire connaître les résultats contradictoires obtenus par les divers physiciens, nous dirons que M. Barlow, qui a trouvé la cause de ces contradictions, a reconnu qu'en faisant chauffer au rouge blanc des barres de fonte, de fer et d'acier, la fonte de fer, qui avait le pouvoir le plus faible à la température ordinaire, excédait le pouvoir des autres barres au rouge blanc; que le fer malléable, qui avait le pouvoir le plus fort, devenait le plus faible quand il était chaud, et finissait par ne plus exercer d'action sur l'aiguille quand il était chauffé au blanc; qu'à la chaleur rouge sang son action était très-intense. L'influence de la température sur la distribution des aimants a occupé particulièrement Coulomb et M. Kupffer. Le premier, en étudiant les effets de la trempe, a

établi ce principe, qu'en général l'intensité du barreau diminue à mesure que l'on élève la température; il s'était attaché à déterminer seulement la résultante des effets produits par la chaleur sur le magnétisme libre des barreaux, en les faisant osciller en vertu de l'action de la terre pour savoir s'ils avaient perdu ou gagné (*).

M. Kupffer a envisagé la question sous un autre point de vue; il a déterminé la quantité de magnétisme libre que possèdent les différents points d'un barreau quand on fait varier la température. Il a expérimenté de même que Coulomb avait fait pour trouver la distribution du magnétisme libre dans un barreau, c'est-à-dire qu'il a fait osciller une petite aiguille successivement en présence de différents points d'un barreau, et a reconnu, ainsi que Coulomb, que l'intensité de la force magnétique diminue à mesure que l'on élève la température; et en outre, que dans l'intervalle de 0° à 30° R., chaque degré de chaleur augmente à peu près d'une demi-seconde la durée de trois cents oscillations de l'aiguille; M. Kupffer enfin a déterminé la loi du décroissement des forces magnétiques à des températures supérieures à 30°, et a donné la formule qui la représente.

M. Christie s'est occupé de la même question (**); mais la méthode analytique dont il s'est servi n'est pas aussi simple que celle de M. Kupffer.

De l'action des aimants sur tous les corps en repos et en mouvement.

Avant Coulomb, les physiciens avaient fait de vains efforts pour reconnaître des traces de magnétisme dans tous les corps; aussi furent-ils fort étonnés en apprenant, en 1802, qu'il venait de communiquer à l'Académie des sciences une série d'expériences qui montraient que tous les corps jouissaient de la propriété magnétique, à des degrés plus ou moins marqués. Il mit ce fait en évidence en faisant osciller, entre les deux pôles opposés de deux forts barreaux, de petits cylindres d'une substance quelconque suspendus à un fil de coton. On douta d'abord que cette action fût magnétique, mais nous démontrâmes que l'origine de ces phénomènes était réellement magnétique. Des découvertes postérieures confirmèrent ce fait; particulièrement l'observation intéressante de M. Arago, relative à l'action de tous les corps sur l'aiguille aimantée, pour diminuer l'ampli-

(*) *Traité de l'électricité et du magnétisme terrestre*, t. II, p. 362.
(**) *Philosophical transactions*, 1825, 1re part.

tude des oscillations sans en changer le nombre, les métaux agissant avec plus d'énergie que le verre, le bois, etc. M. Arago partit de cette observation pour mettre en mouvement une aiguille aimantée, librement suspendue au-dessus d'une plaque quelconque, à laquelle on imprimait un mouvement de rotation; il reconnut que l'action que reçoit l'aiguille décroît pour la même vitesse à mesure que la distance de l'aiguille aux disques ou plaques diminue; que les effets sont moindres quand les disques sont évidés dans la direction des rayons que lorsqu'ils sont pleins. En analysant ce phénomène, M. Arago, pour déterminer les directions de la force développée sur les disques tournants, a recherché les composantes de cette force, suivant trois lignes parallèles à trois plans coordonnés. Les observations de M. Arago ont été l'objet de recherches de la part de MM. Prévost et Colladon, Babbage, Herschel, Barlow, Nobili, Basselli, Christie, et enfin de M. Faraday qui a été conduit par là à la découverte importante des courants par induction.

En 1825, M. Barlow fit connaître le résultat de recherches intéressantes sur les effets magnetiques produits dans le fer par la rotation, dont la théorie mathématique a su tirer parti pour la vérification des formules; cette théorie a été établie par M. Poisson. Dans l'impossibilité où nous sommes d'en donner tous les développements, nous indiquerons seulement la marche qu'il a suivie pour déterminer les résultantes des attractions et des répulsions des deux fluides, boréal et austral, dont la réunion forme le fluide magnétique, ainsi que la distribution de ce fluide sur tous les corps aimantés:

« Dans l'acte de l'aimantation, les deux fluides boréal et austral, qui étaient réunis à l'état neutre, se sont très-peu écartés les uns des autres. Nous ne déciderons pas si les parties des corps aimantés dans lesquelles la décomposition du fluide neutre peut s'effectuer, sont les molécules mêmes de ces corps; nous supposerons seulement que leurs dimensions sont toujours extrêmement petites. Nous appellerons *élément magnétique* chacune de ces petites parties, dont la propriété caractéristique consiste en ce que les quantités des deux fluides y sont égales entre elles, dans l'état d'aimantation comme dans l'état neutre. Or, nous pouvons concevoir, pour envisager la question dans sa plus grande généralité, que les éléments magnétiques ne sont pas contigus dans l'intérieur des corps aimantés; qu'ils y sont au contraire séparés les uns des autres par des espaces pleins ou vides où les deux fluides ne peuvent pénétrer, et que les dimensions de ces intervalles isolants sont du même ordre de grandeur que celles des élé-

ments magnétiques, sans cependant que le rapport des unes aux autres soit le même dans les aimants de nature différente. Cela étant, les attractions et répulsions, exercées par ces corps dans les mêmes circonstances, seront différentes, comme l'expérience l'a déjà fait connaître à l'égard du nickel et du fer. Ainsi, nous nous représenterons un corps aimanté comme un assemblage de parcelles magnétiques, séparées par des espaces inaccessibles au magnétisme. Le rapport de la somme de toutes ces parcelles au volume entier du corps qu'on pourrait prendre pour sa densité, sous le rapport du magnétisme, sera une fraction qui approchera plus ou moins de l'unité dans les corps de nature diverse, et qui devra être donnée pour chaque corps en particulier; les actions extérieures augmenteront ou diminueront d'intensité avec la grandeur de ce rapport. »

On voit dans le mémoire de M. Poisson de quelles lois dépendent ces actions; il y indique aussi la possibilité de vérifier la théorie par l'expérience, en faisant varier à volonté le rapport dont on vient de parler, en mélangeant, dans des proportions convenables, de la limaille de fer très-fine avec une autre matière non magnétique, soumettant ensuite ces corps à l'influence de très-forts aimants, et mesurant les attractions et répulsions.

M. Poisson suppose que le pouvoir attractif ou répulsif des deux fluides est le même dans tous les corps aimantés à distance égale pour des quantités égales de fluide. Cette supposition est la plus simple que l'on puisse faire *à priori*.

La quantité qui exprime le rapport de la somme du volume des éléments magnétiques au volume entier du corps dont ils font partie, peut dépendre de la température du corps; car on conçoit que la chaleur dilate les espaces qui séparent les éléments les uns des autres, et comprime ces éléments sans changer dans le même rapport le volume total. Dans cette hypothèse, les attractions ou répulsions magnétiques exercées par un même corps devront varier avec son degré de chaleur, ce qui a lieu en effet. Tels sont les principes généraux qui ont servi de base aux calculs de M. Poisson.

Du magnétisme terrestre.

La détermination des différents éléments dont se compose la résultante des forces magnétiques terrestres a été, depuis deux siècles, l'objet des recherches des physiciens, et surtout des navigateurs qui ont fait le tour du monde. Les appareils employés jusqu'ici à cette détermination joignent, à une grande précision, une manœuvre

assez facile pour que des observateurs peu exercés obtiennent des résultats sur l'exactitude desquels on puisse compter ; mais on ne s'en est pas tenu là, car on vient de substituer à ces moyens simples et faciles d'observation des procédés compliqués, plus sensibles à la vérité, mais fondés sur des résultats d'analyse dont les développements ne sont pas toujours à la portée des observateurs ordinaires, et qui ne peuvent être que très-difficilement employés dans les voyages de long cours. Cette révolution dans les observations magnétiques est due à M. Gauss, qui, à cet effet, s'est associé M. Weber. Nous ne pouvons ici décrire les appareils anciens et modernes employés aux recherches relatives aux observations du magnétisme terrestre ; nous dirons seulement que ces recherches sont faites aujourd'hui avec un soin tel que l'on a égard non-seulement aux variations qui surviennent dans l'intensité du magnétisme des aiguilles, mais encore à l'influence de la chaleur et à l'attraction locale, soit des vaisseaux sur lesquels sont placés les instruments magnétiques, soit des pièces de fer situées près des observatoires magnétiques dont nous n'avons pas encore parlé.

Les premières observations concernant les effets de l'attraction locale des vaisseaux sont déjà anciennes, car Guillaume Denys, *hydrographe* à Dieppe, en fait déjà mention dans un écrit qui parut en 1666.

Wales, qui accompagnait Cook dans ses voyages, observa le même fait. Depuis, on eut l'occasion, à diverses reprises, de s'en occuper ; on proposa divers procédés pour se garantir des effets de l'attraction locale ; mais celui qui est le plus simple et le plus exact est dû à M. Barlow. Il repose sur le principe suivant :

Les masses diverses de fer, à bord des bâtiments, acquièrent la polarité magnétique sous l'influence de l'action du globe, et agissent ensuite sur les boussoles comme pourraient le faire de véritables aimants. Ce principe posé, M. Barlow admet que si l'on fait varier en même temps la distance et l'élévation d'une plaque de fer doux, par rapport à une aiguille aimantée horizontale, on peut trouver une position où cette plaque exerce la même action que les pièces de fer qui se trouvent sur le bâtiment. Dès lors, cette plaque étant placée d'un certain côté de l'aiguille, doit détruire les effets de l'attraction locale ; tel est le principe sur lequel repose l'usage de la plaque de correction, généralement employée aujourd'hui pour se garantir des effets de l'attraction locale ; mais les masses de fer qui se trouvent à bord des bâtiments n'agissent pas seulement sur les aiguilles des boussoles, elles

influent encore sur la marche des chronomètres, en raison de l'action exercée sur les pièces en acier, et particulièrement sur le balancier. On doit encore les moyens de se garantir de cette influence à M. Barlow, qui emploie à cet effet le balancier compensateur (*). Passons rapidement en revue les recherches relatives aux divers éléments de la résultante des forces magnétiques terrestres.

Des observations de déclinaison.

Les voyageurs qui ont parcouru le globe depuis deux siècles ont recueilli un grand nombre d'observations relatives à la déclinaison de l'aiguille aimantée; mais comme ils ont négligé dans les observations faites à bord l'action exercée sur les boussoles par des causes locales, leurs observations sont entachées d'erreurs.

Halley est le premier qui ait essayé de réunir et de coordonner le grand nombre d'observations faites jusqu'à lui. En 1701, il publia une carte dans laquelle étaient tracées les lignes d'égale déclinaison de 5° en 5°. En raison des changements incessants de la déclinaison, et les méthodes d'observation ayant été perfectionnées, on reconnut que la table d'Halley était défectueuse. Aussi Mountain et Dodsen, en 1745 et 1746, publièrent-ils une nouvelle carte des déclinaisons. En 1787, M. Hansteen donna le tableau le plus complet que l'on eût encore des observations de déclinaison, avec un atlas magnétique où se trouvaient toutes les lignes d'égale déclinaison. M. Barlow reprit ce travail en 1823; mais le capitaine Duperrey publia, en 1836, de nouvelles cartes, dans lesquelles la déclinaison de l'aiguille aimantée se trouve employée selon sa véritable destination, qui est de faire connaître la direction du méridien magnétique en chacun des points où l'observation a été faite, et par suite la figure générale de courbes qui ont la propriété d'être, d'un pôle à l'autre, les méridiens magnétiques de tous les lieux où elles passent. Des milliers d'observations ont été faites et se font encore sur tous les points du globe. Les principales sont consignées au long dans notre ouvrage (**).

Des variations séculaires, annuelles et diurnes de la déclinaison.

La déclinaison de l'aiguille aimantée est soumise à des variations séculaires, annuelles, mensuelles et diurnes, qui peuvent être considé-

(*) Pour tout ce qui concerne l'influence des masses de fer sur les boussoles ou sur les chronomètres, nous renvoyons à notre *Traité d'électricité et du magnétisme*, t. VII, p. 117 et suivantes.

(**) *Traité de l'électricité et du magnétisme*, t. VII, p. 213.

rées les unes comme régulières, les autres comme irrégulières ; celles-ci se montrent, dans certaines circonstances atmosphériques, telles que les aurores boréales, les éruptions volcaniques, les tremblements de terre, etc. Depuis longtemps, les variations séculaires et annuelles ont été observées ; MM. Gauss et Weber ont étudié les variations annuelles, mensuelles et diurnes, au moyen du magnétomètre qu'ils ont construit ; mais parlons d'abord des plus anciennes observations. On ne peut, faute d'observations, remonter au delà de 1580 ; à cette époque, à Paris, l'extrémité nord de l'aiguille déviait à l'est de 11° 30′ ; en 1663, elle se trouvait dans le méridien magnétique ; depuis lors, la déclinaison est devenue occidentale ; en 1814, elle avait atteint son maximum, et depuis elle a continué à diminuer.

En comparant les observations faites aux mêmes époques à Londres et à Paris, on reconnaît que le maximum de déviation a eu lieu, dans ces deux localités, en 1580 ; que de 1657 à 1662, à Londres, la déclinaison était nulle, tandis qu'à Paris ce ne fut qu'en 1663 ; que le maximum de déclinaison à l'ouest a eu lieu à Londres en 1815 et à Paris en 1814. Ainsi, les deux maxima ont eu lieu, à l'est et à l'ouest, sensiblement aux mêmes époques à Paris et à Londres.

Des observations faites au cap de Bonne-Espérance montrent *que*, dans l'hémisphère sud comme dans l'hémisphère nord, la déclinaison est soumise aux mêmes lois, puisqu'on la voit légèrement à l'est en 1605, nulle de 1605 à 1609, et passer ensuite à l'ouest, atteindre son maximum vers 1791, et rétrograder vers l'est.

M. Barlow a essayé de déduire d'une formule les changements progressifs et séculaires qu'éprouve la déclinaison de l'aiguille aimantée, en admettant que le pôle magnétique qui influence l'aiguille à Londres était placé, en 1818, sous la latitude nord 75° 2′, et la longitude ouest 67°41′ ; il en tira la conséquence que le mouvement était uniforme et de 14°10′ en dix ans. Il a calculé, d'après ce principe, la déclinaison à Londres de 1660 à 1818, et a trouvé des différences peu considérables entre les résultats de l'expérience et ceux de l'observation.

Les variations annuelles de l'aiguille aimantée paraissent se rattacher à la position du soleil, à l'époque des équinoxes et des solstices. Cassini, auquel est due cette observation, a trouvé que les variations étaient les mêmes dans les caves de l'Observatoire, où la lumière ne pénètre pas et où la chaleur est sensiblement constante.

Voulant discuter les observations faites en divers lieux, entre au-

tres à Paris et à Londres, M. Arago a pris la déclinaison moyenne de chaque jour, laquelle est la demi-somme de deux déclinaisons maximum et minimum, puis la déclinaison moyenne de chaque mois, ou la somme des moyennes de tous les jours du mois divisée par le nombre de ces jours; il a trouvé un maximum de déclinaison vers l'équinoxe du printemps et un minimum au solstice d'été, mais avec cette différence que l'amplitude de l'oscillation était moindre à Londres qu'à Paris; que le mouvement rétrograde de l'aiguille entre l'équinoxe du printemps et le solstice d'été s'était affaibli en même temps que le mouvement général et annuel vers l'occident.

Outre les variations précédentes, l'aiguille aimantée, dans sa déclinaison, est soumise, comme nous l'avons déjà dit, à des variations diurnes, qu'on observe avec le plus grand soin. Depuis 1722, époque où Graham découvrit ces variations, on a constamment observé leur marche pour remonter, s'il était possible, à la cause du phénomène.

En Europe, l'extrémité boréale de l'aiguille horizontale marche tous les jours de l'est à l'ouest, depuis le lever du soleil jusque vers une heure après midi, et retourne ensuite vers l'est par un mouvement rétrograde, de manière à reprendre à très-peu près, vers dix heures du soir, la position qu'elle occupait le matin. Pendant la nuit, l'aiguille est presque stationnaire, et recommence le lendemain ses excursions périodiques. Bien que les variations de l'aiguille aimantée soient soumises à un mouvement régulier de l'est à l'ouest dans nos contrées, on ne trouve pas cependant deux jours dans l'année qui se ressemblent parfaitement; cette remarque, faite depuis longtemps, a été confirmée par les observations de MM. Gauss et Weber, qui ont poussé l'exactitude jusqu'à des secondes de degré. Le maximum de déviation n'a pas lieu à la même heure sur différents points du globe, comme l'a observé M. Dowe.

On avait annoncé qu'en Danemark, en Islande, ainsi que dans les régions septentrionales, les excursions diurnes de l'aiguille aimantée étaient plus étendues, plus régulières, et ne s'arrêtaient pas pendant la nuit. On en avait conclu que les variations diurnes augmentaient en allant de nos climats au nord, et diminuaient jusqu'à l'équateur magnétique, où elles étaient très-faibles. Mais des observations de variations diurnes faites dans le Nord à Bossekop, par MM. Bravais et Lottin, qui faisaient partie de l'expédition scientifique envoyée dans le Nord il y a quelques années, ont modifié un peu les idées que l'on s'était faites des variations diurnes dans cette ré-

gion; pendant la nuit, l'aiguille est réellement plus agitée que dans nos contrées, mais l'amplitude des oscillations n'est pas aussi étendue qu'on l'avait d'abord annoncé.

Les voyageurs se sont attachés à étudier la marche des oscillations diurnes dans les différentes parties du globe. Des observations faites par John Macdonald, de 1794 à 1796, au fort Mariborough de Sumatra et à l'île de Sainte-Hélène, conduisent à deux conséquences remarquables : 1° que les variations diurnes entre les tropiques ont sensiblement moins d'étendue qu'en Europe; 2° qu'aux mêmes heures où, dans l'hémisphère boréal, l'extrémité nord de l'aiguille marche à l'ouest, son mouvement dans l'hémisphère austral s'exécute en sens contraire. Les observations beaucoup plus récentes de MM. de Freycinet et Duperrey confirment la première de ces assertions.

Outre les variations régulières, la déclinaison est encore soumise à des variations irrégulières, comme on l'a vu précédemment. Parmi les causes qui concourent à la production de ces irrégularités, on range les aurores boréales, les éruptions volcaniques et les tremblements de terre. On doit placer M. Arago au premier rang de ceux qui se sont le plus occupés de constater l'influence des aurores boréales sur les aiguilles aimantées. Relativement aux observations faites à cet égard, nous nous bornerons à dire que la marche de l'aiguille aimantée est dérangée lors de l'apparition de ce météore, non-seulement dans les lieux où on l'observe, mais encore dans des contrées qui en sont éloignées, et où le phénomène n'est pas visible.

Les résultats généraux que nous venons d'indiquer sont déduits d'observations faites avec les boussoles ordinaires; mais les variations de l'aiguille aimantée observées dans ces derniers temps, avec les instruments imaginés par M. Gauss, en confirmant ces résultats, ont conduit à d'autres conséquences. Non content de faire des observations magnétiques journalières dans l'observatoire de Gœttingue, M. Gauss a témoigné le désir que des physiciens se livrassent, comme lui, sur divers points de l'Europe, à des observations suivies, à des époques fixes de l'année, auxquelles il a donné le nom de *périodes* ou *termes d'observation*. L'idée de ces associations est due à M. de Humboldt, qui a provoqué pour ainsi dire sur toute la surface du globe l'établissement d'observatoires magnétiques.

De toutes parts on a répondu à cet appel. Ne pouvant rapporter ici une analyse, même succincte, des intéressants résultats obtenus par MM. Gauss, Weber et leurs coopérateurs, nous dirons seulement que les courbes construites pour représenter les variations de toute nature

établissent que les régions les plus septentrionales paraissent être le foyer principal d'où partent les plus grandes et les plus fréquentes actions perturbatrices ; qu'en divers endroits, dans les différents mouvements successifs, on trouve des variations considérables sous le rapport de leur grandeur, quoique d'ailleurs la ressemblance soit évidente ; que souvent de deux saillies de courbe dans un endroit la première est la plus grande ; que dans un autre endroit, au contraire, c'est la seconde. On est forcé par là d'admettre que dans le même jour et à la même heure, beaucoup de forces agissent indépendamment peut-être les unes des autres, ayant différents siéges, et dont les actions se confondent dans des proportions fort inégales en raison de leur position et de leur distance, lesquelles forces s'influencent réciproquement, de manière que l'une commence à agir quand l'autre n'a pas encore cessé. Au milieu de ce conflit d'actions, il est difficile de suivre la marche du phénomène ; néanmoins, on doit penser qu'on parviendra à démêler les diverses causes perturbatrices, lorsque la participation aux observations simultanées aura reçu une plus grande extension.

Des observations d'inclinaison.

Les observations relatives à l'inclinaison ont occupé les voyageurs non moins que celles de la déclinaison ; mais elles paraissent avoir moins d'importance que ces dernières, en raison du rôle que jouent les déclinaisons dans la détermination des méridiens magnétiques. En étudiant la marche de l'inclinaison en partant de Paris, et se rendant vers le nord, on a reconnu que le pôle austral de l'aiguille s'abaissait de plus en plus au-dessous de l'horizon ; que l'inclinaison augmentait avec la latitude, et que dans les régions polaires il existait des points où elle était à 90° ; qu'en se dirigeant, au contraire, dans l'hémisphère austral, il existait, non loin de l'équateur, des points où l'aiguille était sans inclinaison, et qu'au delà de ces points l'inclinaison recommençait, mais en sens inverse, et continuait à augmenter jusque vers les pôles où elle était de 90°. La courbe qui comprend tous les points où l'aiguille aimantée est sans inclinaison a été nommée *équateur magnétique*, et les points où l'aiguille est verticale, *pôles magnétiques* (*).

L'inclinaison de l'aiguille aimantée est égalcment soumise, comme la déclinaison, à des variations continuelles ; mais elles ont été moins

(*) Pour les principales observations d'inclinaison, voir le t. VII, p. 304 et suivantes, de l'ouvrage déjà cité.

observées que celles relatives à cette dernière. On a trouvé qu'elles ont toujours été en diminuant depuis 1671 jusqu'à cette époque, et l'on a considéré la variation progressive qu'éprouve l'inclinaison comme la conséquence nécessaire d'un changement dans la latitude magnétique, provenant des nœuds de l'équateur magnétique modifiés par la forme de la courbe. Quant aux variations diurnes, M. Hansteen a reconnu que, pendant l'été, l'inclinaison était d'environ 15′ plus forte que pendant l'hiver, et d'environ 4′ ou 5′ avant midi qu'après.

De l'intensité magnétique du globe en divers points de sa surface.

L'intensité magnétique du globe a successivement attiré l'attention de Graham, le premier qui ait observé les variations diurnes de l'aiguille aimantée; en 1629, de Muschenbrock, de Lemonnier; en 1776, de Saussure, Borda et d'une foule de physiciens et de navigateurs; mais Borda est le premier qui ait commencé à employer une méthode d'approximation pour observer cette intensité avec plus d'exactitude que ses prédécesseurs. Nous ajouterons que c'est en France que l'on a eu pour la première fois l'idée de déterminer par l'observation l'intensité magnétique du globe en différents points de sa surface. En effet, les membres de l'Académie des sciences, chargés de rédiger les instructions pour l'expédition de la Pérouse, recommandèrent d'observer la durée d'oscillation d'une aiguille d'inclinaison à des stations très-éloignées, afin d'en déduire des différences entre les intensités des forces magnétiques correspondantes à ces stations. Les observations recueillies à cet égard ont été perdues avec l'infortuné la Pérouse; mais les instructions ont survécu et ont été mises à profit par de Rossel, qui accompagnait d'Entrecasteaux dans son voyage à la recherche de la Pérouse. Les résultats des observations faites en 1792 et 1793, à la terre de Van Diémen et à Amboine, ont établi ce fait : que l'intensité des forces magnétiques allait en croissant de l'équateur à chacun des pôles.

Dans un voyage en Amérique, de 1798 à 1803, M. de Humboldt a levé tous les doutes que l'on pouvait avoir sur le fait fondamental découvert par M. de Rossel, en prouvant par de nombreuses observations faites avec le plus grand soin, que l'intensité de la force magnétique du globe variait en différents points. Depuis cette époque, les physiciens et les voyageurs ont constamment recherché la détermination de l'intensité des forces magnétiques terrestres. M. de Humboldt s'est attaché particulièrement à déterminer la loi des variations

de cette intensité, à diverses latitudes, eu s'assurant par des moyens indirects que le magnétisme de son aiguille n'avait pas varié d'une manière sensible. En se rendant au haut Orénoque et au Pico Negro, pendant l'été de 1800, il découvrit que cette intensité allait croissant des basses latitudes aux pôles. On lui doit aussi la découverte d'un fait très-important, c'est le défaut de parallélisme des lignes isodynamiques et d'égale inclinaison. Toutes les observations de M. de Humboldt ont été confirmées par toutes celles faites dans les expéditions anglaises, aux régions polaires et dans les voyages autour du monde entrepris par les navigateurs français.

De 1805 à 1806, MM. de Humboldt et Gay-Lussac observèrent l'intensité en France, en Suisse, en Italie et en Allemagne, avec l'aiguille horizontale. Le major Sabine fit de semblables observations en 1818, 1819 et 1820, dans ses deux voyages dans la baie de Baffin et dans la mer Polaire, en tenant compte des corrections relatives à la température.

De 1819 à 1824, M. Hansteen fit des observations d'intensité en Norwége et sur les bords de la Baltique, et, en 1825, sur les bords du golfe de Botnie; nous voyons ensuite successivement s'occuper de la même question les capitaines Friehsen, Keilau, Bœck et Erman sur les rives de la Baltique et en Allemagne; le major Sabine sur les rives équatoriales de l'Afrique et de l'Amérique, dans le nord de l'Europe, le Groënland et le Spitzberg; le capitaine Lutké, de 1826 à 1829, dans un voyage de circumnavigation, et un grand nombre d'autres navigateurs (*). Nous mentionnerons surtout les observations des capitaines de Freycinet et Duperrey, qui ont apporté à la masse commune bon nombre d'observations relatives à l'intensité magnétique, lesquelles ont toutes été discutées avec une grande sagacité par M. le capitaine Duperrey.

Depuis 1834, MM. Gauss et Weber, ainsi que d'autres observateurs faisant partie de l'association, se sont livrés avec un zèle infatigable à des expériences relatives à la détermination de l'intensité absolue du magnétisme terrestre ainsi qu'à l'observation des variations annuelles, mensuelles et diurnes auxquelles elle est soumise (**). On conçoit parfaitement combien il serait important pour la physique terrestre de pouvoir vérifier, à une époque quelconque, si la force

(*) Pour la relation complète de toutes ces observations, consulter le *Traité d'électricité et du magnétisme*, t. VII, p. 367 et suivantes.

(**) Le tableau des intensités magnétiques en différents lieux de la terre se trouve dans le t. VII de l'ouvrage cité ci-dessus, p. 354 et suivantes.

magnétique du globe, en différents points, a éprouvé quelques variations. Ne pouvant employer des méthodes directes, on est obligé d'avoir recours à d'autres qui présentent plus ou moins de difficultés dans l'exécution ; M. Poisson en a donné une qui n'exige pas l'emploi d'aiguilles aimantées parfaitement identiques, et sous le rapport de leur constitution, et sous celui de leur aimantation. Ce célèbre géomètre a commencé par démontrer qu'il existe une certaine fonction de quantités dont la valeur ne dépend pas des aiguilles employées, mais seulement du magnétisme terrestre de laquelle fonction on le déduit. Cette valeur ne peut être obtenue que par approximation ; mais comme on peut la calculer à tel degré d'approximation que l'on veut, il en résulte que l'on peut diminuer à volonté les erreurs de l'expérience.

M. Arago a proposé une méthode plus directe qui repose sur la propriété que possède une aiguille aimantée, qui est placée au-dessous d'un plateau métallique, auquel on imprimerait un mouvement de rotation, d'être entraînée avec d'autant plus de force que son magnétisme serait plus considérable ; on se débarrasserait de l'action du magnétisme terrestre en faisant l'expérience dans un plan perpendiculaire à la direction de l'aiguille aimantée, en chargeant de petits contre-poids les extrémités de l'aiguille pour que le plateau, tournant avec une vitesse déterminée, la dévie d'un certain nombre de degrés ; ces contre-poids donneraient la mesure de l'intensité magnétique du globe. M. Poisson n'avait fait qu'indiquer la méthode pour déterminer l'intensité absolue du magnétisme terrestre ; M. Gauss a fait plus, il l'a mise en pratique, en suivant une marche analogue, qu'il nous est impossible de faire connaître. (Consulter à ce sujet 7ᵉ vol. du *Traité de l'électricité et du magnétisme*, p. 73.)

Variations de l'intensité.

L'intensité magnétique du globe s'étend indubitablement dans l'espace ; MM. Gay-Lussac et Biot, dans leur voyage aérostatique, ont trouvé qu'elle décroissait très-lentement à mesure que l'on s'éloignait de la terre, car ayant fait osciller la même aiguille à terre et à une hauteur de sept mille mètres, ils ne trouvèrent que des différences presque insensibles dans le nombre des oscillations pendant le même temps. Il est probable que la diminution suit la loi inverse du carré de la distance, comme les attractions magnétiques. Il y a quelque probabilité à supposer que les astres, la lune, le soleil, soient doués aussi de la puissance magnétique ; s'il en était ainsi, leur action

devrait réagir sur nos aiguilles en raison de leur distance et de leur position par rapport à nous. Mais comme ces derniers éléments changeraient par suite des mouvements de la terre et des planètes, il devrait en résulter des variations diurnes et annuelles ; néanmoins on est loin d'attribuer à de semblables causes toutes les variations observées jusqu'ici ; peut-être y contribuent-elles pour une partie, mais il en est d'autres dont on ne saurait nier la coopération. M. Hansteen paraît être un des premiers qui se soient occupés de rechercher les variations diurnes et annuelles auxquelles l'intensité des forces magnétiques terrestres est soumise ; des résultats qu'il a obtenus, on tire les conséquences suivantes : 1° que l'intensité magnétique est soumise à des variations diurnes ; 2° que le minimum de cette intensité a lieu entre dix et onze heures du matin, et le maximum entre quatre et cinq heures de l'après-midi ; 3° que les intensités moyennes mensuelles sont elles-mêmes variables ; 4° que l'intensité moyenne vers le solstice d'hiver surpasse de beaucoup l'intensité moyenne des jours semblablement placés relativement au solstice d'été ; 5° que les variations d'intensité moyenne sont à leur minimum en mai et en juin, et à leur maximum vers les équinoxes.

Les variations de l'intensité ont été observées aussi par MM. Gauss et Weber avec les nouveaux instruments, et il résulte de leurs observations que l'intensité décroît pendant les heures de la matinée, de telle sorte qu'elle atteint son minimum une ou deux heures avant midi, et qu'elle augmente de nouveau à partir de ce temps : MM. Gauss et Weber ont tracé des courbes représentant les variations de l'intensité, de même qu'ils l'avaient fait pour les variations de la déclinaison ; à l'inspection de ces courbes on voit qu'à chaque époque, bien qu'il n'y ait aucune ressemblance à l'endroit où la déclinaison est fortement troublée, il y a également perturbation dans l'intensité.

Discussion des observations magnétiques.

Si toutes les observations magnétiques étaient restées isolées, il eût été difficile d'établir une théorie générale du magnétisme, et d'essayer de remonter aux causes probables des phénomènes magnétiques ; on a donc dû les coordonner toutes et les grouper ensemble. On a formé d'abord ce que l'on nomme les *lignes d'égale déclinaison*, dont on a essayé de tirer parti pour déterminer la position des pôles magnétiques ; mais ces lignes n'ont d'autre importance que de grouper les observations d'une manière méthodique, depuis que

M. Duperrey a fait servir les déclinaisons au tracé graphique des méridiens magnétiques, tels qu'ils doivent être considérés aujourd'hui (*).

La première carte des lignes d'égale inclinaison paraît avoir été dressée par Wilcke et se trouve insérée dans les *Mémoires* de l'Académie de Stockolm pour 1768. Lemonnier reproduisit plus tard cette carte, mais avec des modifications considérables. En 1819, M. Hansteen en a publié d'autres. Les lignes d'égale inclinaison sont analogues au parallèle terrestre qu'elles coupent obliquement; mais elles n'en ont pas toute la régularité, et sont d'autant moins parallèles entre elles qu'elles se rapprochent davantage des régions polaires, où elles circonscrivent les pôles magnétiques de toutes parts.

M. Hansteen a cru pouvoir déduire de la figure des lignes d'égale déclinaison qu'il existait deux pôles magnétiques dans chaque région polaire; mais cette assertion n'est pas généralement admise; et M. Duperrey s'est assuré qu'elle ne pouvait être la conséquence d'aucune des anomalies que l'on remarque dans l'ensemble des observations soit de la direction, soit de l'intensité des forces magnétiques. Suivant lui, les lignes d'égale inclinaison ont, comme les lignes d'égale déclinaison, l'inconvénient de ne pas être l'expression d'un fait uniquement dépendant de l'action du magnétisme.

Parmi les lignes d'égale inclinaison, une attire particulièrement l'attention des physiciens, celle où l'inclinaison est nulle et à laquelle on a donné le nom d'*équateur magnétique*. En 1768, Wilcke en a donné une figure; MM. Hansteen et Morlet l'ont reproduite plus récemment, en se fondant sur les nombreuses observations puisées dans les voyages de Cook, d'Eckberg, de Panton, de la Pérouse, etc. On doit à M. Morlet un moyen facile de faire concourir à la détermination de la courbe qui représente l'équateur magnétique, les observations voisines des lieux qu'elle parcourt. On sait que M. Biot, résumant toutes les actions australes et boréales de magnétisme terrestre en deux centres d'action, qu'il place à une très-petite distance du centre du globe, est arrivé à une formule à l'aide de laquelle on obtiendrait la latitude magnétique d'un point de la surface de la terre en fonction de l'inclinaison de l'aiguille observée en ce point, si la terre était parfaitement homogène; cette formule a été traduite en

(*) Voir *Traité de l'électricité*, t. VII, p. 378, les conséquences que M. Hansteen a tirées des lignes d'égale déclinaison, dans son *Atlas magnétique*, publié en 1787, ainsi que les changements progressifs de situation et de progression des lignes d'égale déclinaison dont on ne peut rien dire ici, en raison des détails dans lesquels nous serions obligé d'entrer.

celle-ci : *La tangente de la latitude magnétique d'un lieu est double de la tangente d'inclinaison.* M. Morlet, qui a fait usage de cette formule, a reconnu qu'elle était applicable aux inclinaisons qui ne passent pas 30°; les résultats obtenus par MM. Hansteen et Morlet se rapportent à l'équateur magnétique de 1780. Dans le cours de son voyage sur la corvette *la Coquille,* M. Duperrey a fait de nombreuses observations qui l'ont mis à même de déterminer, pour l'année 1824, l'équateur magnétique dans la presque totalité de son cours (*).

Les lignes isodynamiques, ou d'égale intensité magnétique, ont été tracées, pour la première fois, par M. Hansteen, sur une carte qui parut en 1826; il en dressa de nouvelles plus complètes et qui parurent en 1832. M. Hansteen, dans ces dernières, rendit comparables les observations, autant que le permettaient les circonstances, en exprimant la valeur de chacune d'elles en fonction du minimum d'intensité que M. de Humboldt avait observé, en 1802, sur l'équateur magnétique, dans l'intérieur du Pérou.

Les lignes isodynamiques, telles qu'elles ont été conçues par M. Hansteen, ont cela de commun avec les lignes d'égale inclinaison, que les unes et les autres sont analogues à des parallèles de la sphère; mais elles sont irrégulières et ne coïncident pas entre elles, c'est-à-dire qu'à inclinaison comme à latitude égales, les rapports d'intensité magnétique présentent des valeurs souvent très-différentes, ainsi que l'avait déjà remarqué M. de Humboldt, durant un voyage aux régions équinoxiales du nouveau monde (**). M. Duperrey a achevé la carte des lignes isodynamiques, restée incomplète faute d'observations dans l'hémisphère austral, et M. le major Sabine a dressé, de son côté, de nouvelles cartes des lignes isodynamiques (***).

Nous n'avons plus à parler maintenant, en ce qui concerne les lignes magnétiques, que des méridiens et des parallèles magnétiques. Les méridiens magnétiques, tels que les considère M. Duperrey, ne sont pas des lignes hypothétiques; ils résultent de la direction de l'aiguille aimantée en chaque point du globe. Supposons que l'on parte d'un point quelconque, et que, cheminant toujours dans le sens de

(*) Voir *Traité de l'électricité et du magnétisme*, t. VII, p. 390 et suivantes, pour tout ce qui concerne le tracé de l'équateur magnétique dont il est impossible de donner une idée dans cette introduction historique.

(**) Pour ce qui concerne les lignes isodynamiques, voir l'ouvrage cité plus haut, t. VII, p. 418 et suivantes.

(***) Pour tous les développements relatifs à ces divers tracés, voir l'ouvrage cité plus haut, p. 420 et suivantes.

la direction de l'aiguille aimantée, d'abord vers le nord, ensuite vers le sud, on relève tous les points par lesquels on aura passé, la courbe qui réunira tous ces points formera un méridien magnétique. Si l'on prend un autre point de départ voisin du premier, et que l'on trace de la même manière un méridien magnétique, ce méridien rencontrera le premier en deux points situés, l'un vers le pôle nord, l'autre vers le pôle sud. En traçant sur le globe un certain nombre de ces méridiens, et prenant les points d'intersection de deux méridiens voisins, on aura alors, dans chaque hémisphère, une courbe fermée, résultant de la réunion de tous les points d'intersection. Il est naturel d'admettre que le pôle magnétique de chaque hémisphère se trouve au centre de l'aire renfermée par ces courbes.

Outre les méridiens magnétiques, M. Duperrey a tracé sur les mêmes cartes des courbes normales aux méridiens, et que, pour ce motif, il a nommées *parallèles magnétiques*, en raison de leur analogie avec les parallèles terrestres. Ces parallèles magnétiques et les méridiens correspondants jouissent de propriétés particulières que M. Duperrey se propose de faire connaître incessamment.

Théories des phénomènes magnétiques et considérations générales.

Le tracé graphique de toutes les lignes magnétiques peut être considéré comme le premier pas vers la solution de la question du magnétisme terrestre. La forme et la position de ces diverses lignes variant avec le temps, il en résulte qu'une même carte ne représente l'état du magnétisme terrestre que pour une époque déterminée. S'il était possible d'avoir des formules générales qui exprimassent, en y introduisant les données nécessaires, l'action magnétique exercée par la terre sur une aiguille aimantée, en un point donné de la surface de la terre et à une époque déterminée, il est évident que la question du magnétisme terrestre serait complétement résolue; mais elle est d'un ordre tellement complexe, que le mathématicien ne saurait trop consulter les observations et les conséquences qui en résultent, s'il veut établir des formules qui soient la représentation exacte des phénomènes.

Bien des théories ont déjà été imaginées pour expliquer le magnétisme terrestre; l'analyse de toutes les théories magnétiques nous conduirait trop loin, nous préférons renvoyer pour leur examen et leur discussion au *Traité d'électricité et du magnétisme* (*).

(*) Tome VII, p. 485 et suivantes.

On a fait jusqu'ici bien des hypothèses pour remonter à la cause du magnétisme terrestre. Gilbert supposa le premier que la terre était un puissant aimant dont l'axe coïncidait presque avec l'axe terrestre; d'après cette hypothèse, les deux pôles magnétiques seraient à peu de distance des deux pôles de la terre. M. Hansteen chercha à prouver qu'il devait y avoir un autre pôle magnétique dans les régions boréales, et sans lequel on ne pouvait rendre compte de tous les phénomènes magnétiques observés. Il faudrait donc supposer qu'un second aimant traversât le globe dans la direction d'un diamètre, dont le pôle coïnciderait avec le pôle magnétique. M. Barlow fit aussi des recherches expérimentales touchant l'origine probable du magnétisme terrestre, et partit de ce principe, que le magnétisme de la terre ne serait pas celui d'un aimant, mais bien celui d'une sphère de fer qui aurait reçu le magnétisme par induction. En conséquence, il s'attacha à prouver que le magnétisme terrestre pourrait bien avoir une origine électrique, c'est-à-dire, provenir de l'action de courants électriques circulant autour du globe, conformément aux idées de M. Ampère. L'expérience de M. Barlow, pour justifier l'exactitude de ses vues théoriques, eut tout le succès qu'il pouvait en attendre (*). Néanmoins, M. Barlow ne s'est pas dissimulé les difficultés qu'il y avait à expliquer l'existence de courants électriques à la surface de la terre; mettant de côté les courants qui auraient une origine chimique et dont la production serait difficile à concevoir, il a donné la préférence à des courants thermo-électriques dus à l'influence solaire.

Nous ferons observer à cet égard que l'on ne peut obtenir des courants électriques dans les roches ou la plupart des substances qui composent la couche superficielle du globe, en raison de leur mauvaise conductibilité électrique. Ainsi donc, il est difficile d'admettre l'hypothèse de M. Barlow; cependant, on ne saurait s'empêcher de reconnaître que les variations annuelles et diurnes de l'aiguille aimantée ne soient dues à la présence du soleil au-dessus de l'horizon. Il faut donc que toutes les parties matérielles de la terre soient douées de magnétisme, lequel éprouve des variations selon que ces parties subissent les influences calorifiques de l'atmosphère par la présence ou l'absence du soleil au-dessus de l'horizon, de même que la chaleur modifie le magnétisme d'un barreau aimanté. Quant à l'existence des courants hydro-électriques circulant dans

(*) Voir *Traité d'électricité et du magnétisme*, t. VII, p. 529 et suiv.

l'intérieur du globe et dans des directions constantes, nous avons déjà exprimé notre opinion sur ce point, page 59 (*).

Les faits manquent de même pour expliquer les autres théories; ainsi nous nous arrêtons, notre but, dans cette introduction, étant de rapporter tout ce que la science a enregistré de vrai et d'exact dans ses annales touchant les phénomènes magnétiques.

CHAPITRE VI.

De l'Optique.

En raison de son importance dans la nature, de son intervention dans un grand nombre de phénomènes, et de ses applications pour la construction d'appareils propres à étudier ces mêmes phénomènes, la lumière est la partie de la physique qui ait été le sujet de plus de recherches de la part des physiciens, jusqu'à l'époque où l'*électricité* attira l'attention générale. Pendant les deux siècles qui viennent de s'écouler, les découvertes en optique se succédèrent rapidement; elles se ralentirent cependant vers la fin du dernier, puis il y eut une recrudescence lors de la découverte de la polarisation.

La lumière, ou plutôt l'optique, se compose de faits tellement variés et ayant des rapports si éloignés entre eux, que si l'on s'attachait à vouloir les rapporter, en suivant l'ordre de la découverte de chacun d'eux, on présenterait un ensemble disparate qui ne permettrait pas de saisir de suite toutes les causes qui ont concouru à la découverte de ces faits. D'un autre côté, plusieurs des faits généraux sont connus depuis si longtemps, que leur origine se perd dans la nuit des temps. Il vaut donc mieux grouper ensemble toutes les propriétés de la lumière qui ont des rapports entre elles; ainsi nous passerons succinctement en revue :

1° Les diverses opinions émises sur l'origine de la lumière;

2° La vitesse de la lumière;

3° La photométrie;

4° La réflexion de la lumière;

(*) Pour de plus grands développements, voir l'ouvrage cité précédemment, t. VII, p. 562 et suiv.

5° Sa réfraction ;

6° La dispersion ou décomposition de la lumière ; sa recomposition, et l'achromatisme ;

7° La vision ;

8° Les instruments d'optique ;

9° La diffraction et les interférences de la lumière ;

10° La double réfraction ;

11° La polarisation.

I. DES DIVERSES OPINIONS SUR L'ORIGINE DE LA LUMIÈRE.

Aristote, qui voulut tout expliquer à l'aide de quelques principes généraux, pensait que les corps transparents, tels que l'air, l'eau, le verre, etc., ne laissaient voir les objets placés derrière eux qu'en raison d'une puissance propre mise en action par le passage de la lumière à travers ces corps. Suivant lui, la lumière n'était point le feu ; elle n'avait rien de matériel, rayonnait du corps lumineux, et se transmettait à travers les corps transparents ; elle était due à la présence du feu dans les corps. Tels étaient les principes de métaphysique, principes très-obscurs qui, jusqu'à Grimaldi et Descartes, servirent de règle pour expliquer les phénomènes lumineux. Grimaldi, né à Bologne en 1518, paraît être le premier qui ait essayé d'expliquer les phénomènes d'optique dans le système des ondes. Descartes posa en principe que la lumière consiste dans un mouvement vibratoire des molécules du corps lumineux, au moyen duquel ces molécules peuvent imprimer un mouvement d'impulsion dans tous les sens aux globules d'un fluide très-subtil répandu dans l'univers et dans tous les corps. Ces globules étant matériels et en contact immédiat, la transmission de la lumière devait être instantanée. Cette théorie fut repoussée et définitivement abandonnée dès que Roemer, en 1675, et plus tard Bradley, en 1728, eurent découvert que la transmission de la lumière n'était pas instantanée, et que l'on eut objecté à Descartes que la lumière ne serait pas réfléchie si les globules de la matière éthérée n'étaient pas doués d'élasticité.

Le P. Malebranche établit une analogie entre la lumière et le son, en substituant aux globules matériels de Descartes des petits tourbillons de matière subtile.

Huyghens imagina le système des ondulations, dont il posa les principes mathématiques avec cette haute supériorité de génie qu'on retrouve dans tous ses travaux ; ce principe, grâce aux recherches de Th. Young, qui a découvert le principe des interférences ; de Malus,

auquel on doit la découverte de la polarisation de la lumière au moyen de la réflexion; de Fresnel, qui a établi le système des ondulations sur des bases solides, en faisant concourir au même but les recherches expérimentales et les recherches analytiques de M. Arago, ce système, disons-nous, permet d'expliquer aujourd'hui les phénomènes lumineux sans avoir recours continuellement à des hypothèses nouvelles. Huyghens admit, comme Descartes, l'existence d'un fluide très-subtil, d'une nature éthérée, répandu dans l'espace, et pénétrant tous les corps, mais éminemment élastique, et dont la densité variait suivant la nature des corps. Il supposa en outre que les molécules des corps lumineux étaient dans un état continuel de vibration, que leur mouvement vibratoire était transmis à la rétine par l'intermédiaire de la matière éthérée qui entrait elle-même en vibration, comme l'eau dans laquelle on projette un corps solide. Ce grand géomètre compara donc la propagation de la lumière dans l'éther à celle du son dans l'air, ou d'un mouvement vibratoire imprimé à un fluide pondérable, avec cette différence néanmoins que la vitesse des oscillations de l'éther était infiniment grande relativement à celle des molécules de l'air qui transmettent le son, ou des molécules de fluide pondérable.

Newton n'adopta pas cette manière de voir. Suivant ce grand philosophe, les objets lumineux projettent dans tous les sens des molécules d'une ténuité extrême, dont les différentes faces ne jouissent pas des mêmes propriétés. Si leur ténuité n'était pas telle, les molécules mettraient en pièces les objets qu'elles frappent. Il admit encore que les molécules obéissaient à l'action de forces attractives et répulsives, lesquelles, résidant en tous les corps, ne se manifestaient qu'à une très-petite distance de leur surface. Telles sont les bases de la théorie de l'émission qui a eu longtemps de nombreux partisans.

En soumettant ces données au calcul, Newton parvint à une explication juste et claire des phénomènes lumineux connus de son temps. Une discussion s'éleva entre les partisans de la théorie des ondes et ceux de la théorie de l'émission. Huyghens chercha à prouver que sa théorie rendait aussi bien compte que celle de Newton, des phénomènes lumineux, et en particulier, de la réflexion et de la réfraction. Depuis lors, les physiciens sont demeurés partagés d'opinions sur la cause de la lumière. Il faut dire, cependant, que la théorie des ondes compte aujourd'hui un bien plus grand nombre de partisans que celle de l'émission.

Quelques faits particuliers avaient paru d'abord ne pouvoir être

expliqués dans aucune des deux théories; entre autres la diffraction découverte par Grimaldi; on en conclut, sur-le-champ, que les rayons lumineux se déviaient de leur direction rectiligne quand ils passaient près d'un corps de nature quelconque. Newton attribua ce phénomène à l'action des forces répulsives dont il avait admis l'existence dans sa théorie. L'hypothèse d'Huyghens ne put d'abord expliquer ce fait, mais Fresnel en donna une explication complète dans la théorie des ondes.

Un autre ordre de phénomènes ne pouvait être non plus expliqué par aucune des théories. Ce phénomène, dont on s'occupait avant Newton, était les couleurs que présentent les couches minces en général, soit liquides, comme dans les bulles de savon, soit gazeuses, comme dans l'espace compris entre une glace plane et une autre de forme lenticulaire, que l'on applique l'une sur l'autre. Pour expliquer ce phénomène, Newton fut obligé de recourir à une théorie basée sur les accès de facile transmission et de facile réflexion, dont il sera parlé plus loin; tandis que dans la théorie des ondes il s'en déduit facilement. Ce phénomène, et celui de la diffraction, ont contribué à ranger un grand nombre de physiciens du côté de la théorie des ondulations.

Enfin on a essayé d'expliquer la lumière en la considérant comme le résultat de décharges électriques continues, produites dans le passage de l'électricité à travers les corps, la transmission ne pouvant s'opérer que par des décompositions et recompositions de fluide naturel dans les espaces moléculaires. Mais les faits sur lesquels on s'appuie ne sont pas assez nombreux pour que cette manière de voir soit prise sérieusement en considération. Passons actuellement aux propriétés de la lumière.

II. VITESSE DE LA LUMIÈRE.

Comme on vient de le voir, Descartes pensait que la lumière se transmettait instantanément. Il croyait en trouver la preuve dans l'observation des éclipses de lune. Mais, comme la lumière emploie moins d'une minute pour venir de la lune à la terre, il ne pouvait en observer la vitesse. Roemer, en observant attentivement l'éclipse du premier satellite de Jupiter, trouva que la lumière employait près de sept minutes pour venir du soleil à la terre; dès lors, sa vitesse était donc de soixante-dix mille lieues par seconde.

La découverte de l'aberration des étoiles fixes, faite plus tard, en 1728, par Bradley, confirma le mouvement successif de la lumière,

dont la vitesse qui s'en déduit s'accorde parfaitement avec celle trouvée par Roemer.

III. PHOTOMÉTRIE.

Cette partie de l'optique, qui comprend les recherches relatives à la mesure de l'intensité de la lumière, est la moins avancée. On a bien des procédés pour comparer, par approximation, les intensités de deux lumières de même couleur; mais ces procédés ne sont plus applicables quand les lumières sont de couleur différente.

Bouguer, en 1760, proposa d'employer, comme photomètre, deux feuilles de papier, de grandeur égale, prises dans la même main, l'une éclairée par une lumière dont on voulait mesurer l'intensité, l'autre par une lumière dont on faisait varier à volonté la distance à cette feuille, et à laquelle on comparait la première. Quand les intensités étaient égales, on calculait celle de l'une en fonction de l'autre, au moyen de la loi des intensités, qui suit la raison inverse du carré de la distance.

Rumfort proposa un autre procédé fondé sur l'égalité des ombres projetées sur une feuille de papier blanc par deux corps opaques, égaux, placés entre les deux lumières.

Un photomètre qui paraît être assez exact est celui imaginé par Ritchie. Les lumières que l'on veut comparer y sont réfléchies par deux miroirs sur une feuille de papier huilée, de sorte que, en éloignant ou rapprochant les lumières, on peut juger facilement quand les deux images sont d'égale intensité. Cet appareil a de plus l'avantage de démontrer que l'intensité de la lumière est en raison inverse du carré de la distance.

Leslie employa son thermomètre différentiel comme photomètre, en partant de ce principe, que la quantité de chaleur rayonnée par un corps lumineux est proportionnelle à la quantité de lumière émise par ce corps, et que les degrés de l'appareil sont aussi proportionnels aux quantités de chaleur. Il n'eut donc besoin que d'explorer successivement les deux lumières à la même distance d'une des boules de son thermomètre, pour comparer leur intensité; mais les principes sur lesquels repose ce procédé n'ont pas été confirmés par l'expérience, de sorte qu'il a été abandonné.

Bouguer, Leslie et Wollaston ont comparé les quantités de lumière envoyées par le soleil et la lune; mais les grandes différences qui existent entre les résultats qu'ils ont obtenus montrent que les procédés employés étaient imparfaits. M. Arago a imaginé aussi plusieurs photomètres plus exacts que les précédents.

IV. RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE, OU CATOPTRIQUE.

Euclide parait être le premier qui ait parlé de la catoptrique ; vinrent ensuite Alhazen et Vitellien, dans les XIe et XIIe siècles. Parmi les modernes, nous citerons le P. Tacquet, le P. Fabri, Jacques Grégory, Isaac Barrow, etc., etc. Les propriétés de réflexion de la lumiere ont été traitées fort au long par le P. Tacquet et par Smith.

Lorsqu'un rayon de lumière tombe sur une surface polie, telle que celle d'un miroir, il se réfléchit en faisant un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence; le rayon incident et le rayon réfléchi sont situés dans un plan normal à la surface réfléchissante au point de réflexion. La réflexion de la lumière a été expliquée dans la théorie des ondulations et dans celle de l'émission par leur fondateur. Newton fut obligé d'admettre que la réflexion était due à l'effet de certaines forces répulsives exercées sur les molécules lumineuses par les particules pondérables du corps réfléchissant. Huyghens n'eut pas besoin de torturer sa théorie; il se borna à dire que lorsque le mouvement ondulatoire des molécules de l'éther arrive à la surface d'un corps réfléchissant, qui est également la surface de séparation de deux portions de l'éther n'ayant pas la même densité, une portion de ce mouvement revient du même côté de la surface et produit la réflexion de la lumière.

Suivant l'explication de Newton, il semblerait que, quelle que fût l'incidence sous laquelle un rayon arrive à la surface, la même quantité de lumière devrait être réfléchie. Mais il n'en est pas ainsi d'après les expériences de Bouguer, entreprises dans le but de comparer l'intensité de la lumière réfléchie à celle de la lumière incidente. Les conséquences que ce physicien en a déduites, sont conformes aux résultats trouvés par Fresnel et M. Arago, au moyen d'un autre procédé; car ils ont conclu de leurs expériences que, pour une même surface réfléchissante, la quantité de lumière réfléchie diminue à mesure que le faisceau incident, ayant toujours la même intensité, s'approche de la normale; et que, pour une même incidence, des surfaces de nature différente réfléchissent des portions très-différentes de ce même faisceau. Pour expliquer la réflexion de la lumière dans la théorie de Newton, il faudrait donc admettre une modification dans la force qui s'exerce entre les molécules de la surface et celles de la lumière, suivant l'obliquité du rayon lumineux; hypothèse qui sépare l'explication de la réflexion de celle de la réfraction.

En se réfléchissant sur des surfaces de formes diverses, la lumière donne lieu à des effets qui ont été observés depuis bien longtemps. Isaac Barrow est le premier physicien qui ait décrit ces effets avec précision à l'égard des miroirs sphériques. Il se produit, en effet, dans ces miroirs, des surfaces brillantes qui reçoivent plus de lumière que les parties adjacentes, et auxquelles on a donné le nom *de caustiques par réflexion*. Parmi les physiciens et les géomètres qui se sont le plus occupés des caustiques, nous citerons d'abord Tsirnaus (Mém. de Leipzig, 1682), puis J. Bernouilli, Malus, Petit, etc., etc. La propriété réfléchissante des miroirs courbes a été, dit-on, mise à profit par Archimède pour incendier la flotte des Romains; il composa, à cet effet, un système de miroirs plans pour remplacer un miroir courbe. Buffon fit aussi usage d'un miroir de ce genre, dont la distance focale était de 25^m,98, et avec lequel il obtint de grands effets de combustion.

La réflexion de la lumière a été mise à profit, depuis le commencement de ce siècle, pour mesurer les angles des cristaux avec une extrême précision. Les instruments employés à cet usage sont nommés *goniomètres à réflexion*. Malus en imagina un qui sert à déterminer les angles des cristaux d'une certaine dimension; tandis que Wollaston a enrichi la science d'un autre instrument, fondé sur le même principe, et qui sert à trouver les angles des cristaux les plus petits; il a reçu de grands perfectionnements en Allemagne, particulièrement de la part de M. Mitscherlich. Enfin, on a fait une autre application de la lumière pour la construction de l'héliostat, instrument qui sert à rendre fixe un rayon solaire réfléchi, malgré le mouvement apparent du soleil.

On sait que lorsque l'on reçoit un rayon lumineux dans une chambre obscure, ce rayon change bientôt de place en raison du mouvement diurne apparent du soleil. Le but de l'héliostat est de faire mouvoir une surface réfléchissante; de telle sorte que, malgré le mouvement apparent du soleil, les rayons qui tombent sur ce miroir soient constamment réfléchis suivant la même direction. Sgravesand a le premier résolu ce problème au moyen d'un mouvement d'horloge, et récemment, l'héliostat a reçu de grands perfectionnements de la part de M. Gambey.

V. DE LA RÉFRACTION SIMPLE OU DIOPTRIQUE.

Toutes les fois qu'un rayon de lumière passe d'un milieu dans un autre, il est dévié de sa direction; on dit alors qu'il est *réfracté*. La

déviation dépend de la densité plus on moins grande du nouveau milieu dans lequel passe le rayon, de la nature du corps réfringent et du degré d'obliquité d'incidence du rayon. Descartes a découvert la loi de ce phénomène dont voici l'énoncé :

Le rayon réfracté, ainsi que le rayon incident, sont dans un plan perpendiculaire à la surface ; le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction sont dans un rapport constant pour la même substance réfringente, et quelle que soit l'incidence.

Ce rapport a été appelé *indice de réfraction.*

La détermination de l'indice de réfraction des corps a beaucoup occupé les physiciens. Pour simplifier la question, ils ont d'abord supposé que pour un rayon incident il n'y avait qu'un seul rayon réfracté. Autrement, on aurait été obligé de tenir compte des effets de la dispersion de la lumière, c'est-à-dire, de la différence de réfrangibilité des différents rayons qui composent le faisceau.

Newton est le premier qui ait déterminé avec exactitude les indices de réfraction de diverses substances solides et liquides. Ayant rangé les corps suivant leur puissance réfractive, il remarqua que le diamant et l'eau se trouvaient à côté des huiles, c'est-à-dire, à côté de corps qui contenaient un principe combustible ; il en tira aussitôt la conséquence que ces deux corps devaient contenir également un principe combustible ; hypothèse qui fut changée en vérité par les expériences de Lavoisier. Mais quel est ce principe commun aux huiles et aux résines qui leur permet d'agir si puissamment sur la lumière quand elle les traverse ? C'est ce que MM. Biot et Arago ont voulu trouver en déterminant avec une grande exactitude les pouvoirs réfringents des substances gazeuses.

A cet effet, ils ont introduit les gaz dans des vases prismatiques dont les extrémités étaient fermées par des glaces parallèles, et dont l'angle réfringent était beaucoup plus grand que pour les liquides, attendu que les gaz, à angle égal, ont une réfraction moindre que ces derniers. Puis ils ont opéré en faisant usage, comme Newton, du minimum de déviation du rayon qui traverse le prisme, et en tenant compte des changements de pression, de température. Alors ils ont trouvé que la force réfringente du gaz hydrogène surpasse de beaucoup celle des autres gaz, et même des autres substances observées jusqu'ici.

Or, comme ce principe combustible existe en grande quantité dans les résines, les huiles, ainsi que dans l'eau, c'est donc à lui qu'il faut

rapporter la grande force réfringente remarquée par Newton dans les substances combustibles.

Pour la détermination des indices de réfraction d'un solide et d'un liquide transparent, on emploie la même méthode. Pour le corps solide, on le taille en prisme dont on mesure l'angle réfringent avec un goniomètre à réflexion; puis, en le disposant convenablement, on détermine la déviation *minimum*. Cette déviation, l'angle réfringent et l'indice de réfraction, font partie d'une formule dont on tire facilement l'expression de celui-ci.

Quant au liquide, on suit absolument le même procédé, si ce n'est que l'on opère avec un prisme de verre, percé horizontalement de part en part; on ferme ce canal avec deux lames de verre, à faces bien parallèles, et l'on introduit le liquide dans la cavité, au moyen d'une ouverture pratiquée à cet effet. Wollaston a indiqué le procédé suivant, pour le cas où le liquide sur lequel on veut opérer serait en trop petite quantité.

On place cette petite portion de liquide sur un prisme de verre dont l'angle réfringent est droit; puis on observe l'angle de réflexion totale à la surface des deux corps. Cet angle entre dans une formule au moyen de laquelle on calcule l'indice de réfraction; s'il n'y en a que quelques gouttes, on les place entre un verre bien plan et l'objectif d'un microscope auquel ce verre est tangent. Au moyen de la comparaison des distances auxquelles on voit un objet au microscope avec et sans l'interposition du liquide, on en déduit l'indice de réfraction de ce dernier : ce même procédé peut s'appliquer à une parcelle de corps solide, et toutes les fois que cet indice ne dépasse pas celui du verre, il suffit d'en coller les fragments sur les faces d'un prisme.

Dans le cas où l'indice de réfraction du corps dont on n'a qu'une portion est plus grand que le verre, pour le déterminer, on cherche l'angle de polarisation du corps. On déduit facilement l'indice de réfraction au moyen de la loi de Brewster, savoir, que *la tangente de l'angle qui forme le rayon polarisé avec la normale, est égale à l'indice de réfraction.*

On a vu précédemment que MM. Biot et Arago avaient déterminé l'indice de réfraction des gaz, pour remonter à la cause du grand pouvoir réfringent des substances combustibles. Mais ce n'était pas là leur but unique; ils avaient l'intention de faire un travail complet sur l'indice de réfraction des gaz, leur puissance réfractive et leur pouvoir réfringent. Ce travail a été exécuté en 1805. Après avoir déter-

miné l'indice de réfraction de l'air, ils ont procédé à la détermination des indices des autres gaz pour des températures et des pressions connues, ce qui les a mis à même d'établir ce principe fondamental :

Les puissances réfractives d'un gaz sont proportionnelles à sa densité, c'est-à-dire, que le pouvoir réfringent d'un gaz est constant à toute température et à toute pression.

On entend par *puissance réfractive* d'une substance, le carré de son indice diminué de l'unité ; et par *pouvoir réfringent*, le quotient de la puissance réfractive par la densité du corps.

Le principe précédent s'applique encore au mélange des gaz, c'est-à-dire, que la puissance réfractive d'un gaz est égale à la puissance réfractive de ses éléments. Mais il n'en est pas de même quand les gaz se combinent, ainsi que le reconnut Dulong dans les expériences qu'il entreprit, en 1825, pour comparer entre elles les puissances réfractives des gaz, à la même température et sous la même pression. Il employa à cet effet un moyen très-ingénieux qui lui permit d'obtenir des résultats de la plus grande exactitude. Ce moyen consiste à donner aux différents gaz une densité telle, qu'ils imprimassent tous exactement la même déviation à la lumière. Voici les conséquences auxquelles ont conduit les expériences de Dulong :

« 1° Il n'y a aucun rapport entre les nombres qui représentent les « puissances réfractives des gaz, et ceux qui représentent leurs den- « sités ; car ces nombres croissent tantôt dans un sens, tantôt dans un « autre.

« 2° La puissance réfractive d'un mélange est égale à la somme des « puissances réfractives de ses éléments. L'air étant dans ce cas, on « en a conclu que ses principes étaient à l'état de mélange et non de « combinaison.

« 3° La puissance réfractive d'un composé gazeux est tantôt plus « grande, tantôt plus petite que la somme des puissances réfractives « des composants.

« 4° Le pouvoir réfringent d'une substance à l'état liquide est plus « grand que le pouvoir réfringent de la même substance à l'état « gazeux. »

Ce dernier résultat avait été trouvé en 1815, par MM. Arago et Petit (*Ann. de phys. et chim.*, t. I).

Jusqu'ici il n'a été question que de l'indice de réfraction des substances transparentes ; mais Wollaston parvint à cette même détermination dans les corps opaques, au moyen du phénomène de la réflexion totale, qui a lieu quand la lumière, pour sortir de l'eau

dans l'air, se présente sous un angle plus grand que l'angle limite.

Le mirage que l'on observe si fréquemment en Égypte et sur mer, est un phénomène de réfraction; en effet, toutes les fois que la lumière passe d'un milieu plus dense dans un milieu qui l'est moins, il y a un angle d'incidence pour lequel l'angle de réfraction est droit, c'est-à-dire parallèle à la surface. Au delà de cette incidence, les rayons incidents ne sont plus réfractés, mais réfléchis intérieurement; telle est la cause du mirage dont, le premier, Monge donna l'explication.

L'étude de la réfraction a particulièrement occupé et occupe encore les astronomes, attendu que les rayons émanés des astres éprouvent une déviation telle, en passant dans notre atmosphère, que ces astres paraissent plus élevés au-dessus de l'horizon qu'ils ne le sont en effet. L'angle de déviation qui nous les fait voir dans une position qui n'est pas la leur, est appelé *réfraction astronomique*.

Tycho-Brahé est le premier qui ait déduit de l'observation la réfraction du soleil, de la lune et de quelques étoiles fixes; il trouva, pour le premier, des valeurs plus grandes que pour les étoiles; et pour la seconde, des valeurs quelquefois plus grandes, quelquefois plus petites que celles des étoiles.

On doit à Snellius une théorie de la réfraction astronomique; à la Hire, une table de ces réfractions fondée sur des observations précises, qui fut modifiée par Bouguer, et subira de nouvelles modifications, tant que l'on n'aura pas déterminé avec la dernière exactitude tous les éléments qui concourent à la production de la réfraction astronomique. Il faut, pour cela, savoir comment la température, la densité et l'état hygrométrique de l'air interviennent dans la production du phénomène.

Laplace, qui s'est occupé de ces diverses questions dans sa *Mécanique céleste*, a été conduit à des résultats tellement importants, que nous ne pouvons nous dispenser de les mentionner ici; savoir, que l'influence de l'humidité sur la réfraction est tout à fait insensible; que toutes les lois proposées jusqu'ici pour déterminer la diminution qu'éprouve la chaleur, à mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère, sont inexactes. L'illustre géomètre leur en substitua une autre, dans laquelle il s'assujettit à représenter à la fois des observations de réfraction; celle du baromètre sur les montagnes, et les expériences faites directement sur cette diminution, dans les ascensions aérostatiques.

Laplace considéra d'abord la réfraction, lorsque la hauteur

apparente des astres excédait 12°, et prouva qu'elle ne dépendait alors que de l'état du baromètre et du thermomètre dans le lieu de l'observation, d'où il déduisit une méthode simple pour construire une table de réfraction, depuis 12° de hauteur apparente jusqu'au zénith; enfin, il fit voir qu'au-dessous de 12° de hauteur apparente, il était nécessaire d'avoir égard aux variations de densité et de température des diverses couches atmosphériques que le rayon traverse.

Des lentilles.

On a déjà vu que Roger Bacon était un des premiers qui aient parlé des propriétés des verres terminés par des surfaces sphériques; propriétés qui nous montrent les corps avec des dimensions plus petites ou plus grandes que celles qu'ils ont en réalité. Ces verres, depuis nommés *lentilles*, à cause de leur forme, servent à la construction des lunettes, des microscopes et de divers instruments d'optique.

Suivant les surfaces qui les terminent, les lentilles sont sphériques, elliptiques, paraboliques, cylindriques; mais les physiciens se sont particulièrement occupés des premières, attendu qu'elles sont les seules qui entrent dans la composition des instruments d'optique les plus utiles. En combinant de toutes les manières possibles les surfaces planes et sphériques, on forme six lentilles différentes, employées à divers usages.

Dans l'étude que l'on a faite des lentilles, on distingue, entre autres choses, les parties suivantes : l'axe, ou ligne mathématique qui joint les deux centres de courbure des deux surfaces; le centre optique, qui jouit de la propriété que tous les rayons lumineux qui en émanent, prennent, en sortant de la lentille, après avoir été réfractés, une direction parallèle à celle qu'ils avaient en y entrant. Dans les courbures sphériques, les rayons partis d'un point quelconque ne forment pas tous un foyer au même point; de là résulte l'aberration de sphéricité; inconvénient que l'on évite avec des lentilles à courbure elliptique ou parabolique, puisque les rayons émanés d'un point lumineux sont parallèles. Cette condition se trouve remplie dans les lentilles à échelons, composées chacune d'une lentille ordinaire plan-convexe et de pièces sphéro-prismatiques annulaires.

Buffon voulut construire des lentilles à échelons; mais il ne put obtenir des résultats bien satisfaisants, parce qu'il avait fait tailler les lentilles partielles dans un seul morceau de verre. Fresnel reprit la question, et la résolut complétement; il calcula d'abord les courbures de chacun des anneaux, puis fit connaître comment on pou-

vait les travailler avec exactitude. M. Arago s'est réuni à lui à l'effet de faire des expériences pour trouver les meilleurs moyens de produire une vive lumière au foyer de ces lentilles, qui permettent de substituer aux phares par réflexion, les phares par réfraction qui ont une grande supériorité sur eux. Au foyer de ce système de lumière, on a placé une lampe à quatre mèches concentriques, dont la lumière est visible à une distance de dix à douze lieues en mer. Ce système d'éclairage est en usage aujourd'hui sur les côtes de France.

Que de recherches ont déjà été exécutées sur la réfraction de la lumière! Elles démontrent que la réfraction est une des parties les plus importantes de l'optique, en raison de ses applications et des conséquences qu'on peut en tirer pour la théorie de la lumière. La preuve en est que la théorie de l'émission et celle des ondulations ont toujours cherché à rattacher la loi de la réfraction à l'hypothèse qui leur servait de point de départ.

VI. DE LA DÉCOMPOSITION ET DE LA RECOMPOSITION DE LA LUMIÈRE; — DE LA DISPERSION; — DE L'ACHROMATISME.

Suivant Aristote et ses partisans, la couleur dépendait d'une propriété inhérente aux corps colorés et indépendante de la lumière. Les Cartésiens admettaient, de leur côté, la présence d'un milieu mis en mouvement par l'action des corps colorés, et qui transmettait cette action à l'organe de la vue. Mais Newton donna une explication exacte des couleurs, en analysant les phénomènes qui ont lieu dans la décomposition de la lumière à l'aide du prisme. Ce grand physicien commença par démontrer qu'un rayon de lumière blanche est composé de sept ordres de rayons différents produisant chacun une sensation particulière sur la rétine. Ces rayons sont ainsi rangés d'après leur réfrangibilité, rouge, orangé, jaune, vert, bleu, indigo, violet; ce dernier étant le plus réfrangible.

Pour obtenir la décomposition de la lumière, il suffit de réfracter un rayon solaire à travers un prisme, et de recevoir l'image sur une feuille de carton blanc, dans une chambre noire. Au lieu de l'image du soleil qui est circulaire, on voit une image allongée perpendiculairement aux arêtes parallèles du prisme, composée des diverses couleurs indiquées ci-dessus, et dont l'ensemble compose ce que l'on appelle le *spectre solaire*. En expérimentant avec des prismes de différentes substances incolores, ayant le même angle et la même position, les couleurs se succèdent toujours dans le même ordre, mais elles n'occupent pas dans le spectre des espaces proportionnels. La

décomposition de la lumière est due à l'inégale réfrangibilité des différents ordres de rayons lumineux.

Newton avait admis en principe que chaque rayon avait une réfrangibilité qui lui était propre; il résultait naturellement de là que des rayons également réfrangibles devaient produire sur nous la même sensation de couleur; mais nous verrons plus loin que Brewster a montré qu'il n'en était pas toujours ainsi. Newton, après avoir décomposé la lumière blanche en divers rayons colorés, recomposa cette même lumière en reportant sur un même point les rayons diversement colorés. Au moyen des lois de la dispersion de la lumière, on peut expliquer les couleurs irisées d'un corps vu à travers un prisme. Newton donna une règle empirique à l'aide de laquelle il détermina la couleur composée produite par la superposition de plusieurs couleurs prismatiques. Cette règle, qui a été vérifiée par un grand nombre d'expériences, consiste à partager un cercle en sept secteurs différents, dont il donna les angles. Si l'on suppose que chacun de ces secteurs possède une des couleurs du spectre, le rapport des grandeurs de ces secteurs représente le rapport des espaces colorés du spectre. En faisant tourner rapidement un tel spectre autour de son centre, il paraît sensiblement blanc.

La réfraction d'un rayon de lumière blanche à travers une substance quelconque, doit donner naissance à plusieurs rayons réfractés, en raison de sa composition et de la différence de réfrangibilité des rayons colorés. On a donc à déterminer les indices de réfraction de chaque rayon coloré; Frauenhoffer a pris pour ligne fixe dans chaque rayon du spectre, la raie principale qui lui correspond, et dont il va être question.

La lumière blanche étant formée de toutes les couleurs simples prises dans la proportion que donne le spectre, il s'ensuit que si l'on supprime l'une de ces couleurs, ou que l'on en altère la proportion, la lumière n'est plus blanche. Dans ce cas, la lumière blanche est donc censée formée et de la lumière enlevée et de la lumière restant au corps; ces deux couleurs sont dites complémentaires l'une de l'autre. La question des couleurs complémentaires a beaucoup occupé Newton, qui a donné une règle à l'aide de laquelle on peut obtenir la couleur complémentaire d'une teinte quelconque.

Diverses théories ont été données pour expliquer la couleur des corps. Newton pensait que les couleurs des corps ne leur étaient pas inhérentes, et qu'elles résultaient de la disposition particulière des molécules qui les rend propres à réfléchir en plus grande abon-

dance les rayons d'une même couleur, et à transmettre, à éteindre ou absorber les autres.

Pour expliquer les couleurs des corps, Mayer n'a admis que trois couleurs primitives, le rouge, le jaune et le bleu, sans y comprendre le noir, qui résulte de l'absence de la lumière.

Young choisit pour les trois couleurs fondamentales, le rouge, le vert et le violet; enfin M. Brewster donna aussi une autre analyse du spectre. Ce physicien prend les trois couleurs de Mayer, et pose ensuite en principe que le spectre solaire est formé par la superposition de trois spectres, chacun de couleur homogène, de même étendue, mais dans lesquels le maximum d'intensité n'est pas placé de la même manière. D'après cela, une couleur quelconque du spectre serait donc composée de trois couleurs fondamentales en diverses proportions. M. Brewster a fondé sa théorie sur ce fait, que lorsque l'on fait passer des rayons lumineux dans des dissolutions de même couleur, celles-ci laissent passer un mélange de rayons de cette couleur et de rayons d'une autre couleur. L'hypothèse du physicien anglais peut rendre compte des phénomènes comme celle de Newton; nous reviendrons sur ces théories.

Le spectre solaire présente encore diverses propriétés, mais une entre autres que Wollaston paraît avoir aperçue le premier, et dont Frauenhoffer a donné une description complète. Voici en quoi consiste cette propriété : lorsqu'on observe un spectre avec une lunette, on le voit sillonné transversalement par un grand nombre de raies ou bandes noires très-étroites; ces raies sont inégalement réparties dans l'intérieur du spectre, et on n'en compte pas moins de six cents, parmi lesquelles on en distingue sept plus faciles à reconnaître, une dans chaque couleur. Frauenhoffer a observé que, pour chaque prisme différent, la position relative des raies change un peu, et que chaque lumière ne donne pas les mêmes résultats. Cette propriété a permis de comparer entre elles les différentes lumières.

Frauenhoffer, qui a fait un grand nombre d'expériences sur les raies, a reconnu que, pour la même espèce de lumière, le nombre de raies, leur forme et leur disposition sont tout à fait indépendants de l'angle réfringent du prisme; que les raies de la lumière directe du soleil sont les mêmes que celles de la lumière des planètes, de la lune, des nuages, de l'atmosphère, tandis que la lumière des étoiles, des flammes, de l'électricité, donne des raies disposées d'une autre manière; et que la lumière électrique, celle des lampes, de la flamme de l'alcool, donnent des raies brillantes au lieu de raies obs-

cures. La lumière qui passe dans le gaz nitreux ou dans d'autres gaz colorés produit un spectre dans lequel on aperçoit des raies noires irrégulièrement disposées, et dépendantes de la nature de ces gaz.

Sans que l'on puisse encore assigner quelle est la véritable cause de ces raies, on est porté à croire qu'elles sont dues à l'absorption de certains rayons dans le passage de la lumière à travers l'air ou divers milieux.

On voit maintenant pourquoi les raies du spectre peuvent servir de points fixes pour déterminer avec une grande précision les indices de réfraction des principaux rayons colorés; car elles permettent de séparer très-exactement diverses parties du spectre sur lesquelles on veut opérer.

De l'arc-en-ciel, des halos et des parhélies.

La décomposition de la lumière, sa réflexion et sa réfraction, sont la cause de la production de l'arc-en-ciel, des halos et des parhélies, dont nous ne pouvons nous dispenser de dire quelques mots, bien que nous ayons l'intention d'exposer ces phénomènes dans cet ouvrage avec de grands développements, car nous ne devons rien omettre de ce qui concerne la lumière. On sait que l'arc-en-ciel se produit toutes les fois qu'un spectateur, tournant le dos au soleil, regarde un nuage placé en face de lui et qui se résout en pluie. Assez ordinairement on voit deux arcs; l'un intérieur, dont les couleurs sont plus vives, l'autre extérieur, plus pâle, et présentant les couleurs du prisme, mais avec cette différence toutefois que dans l'arc intérieur, le rouge est le plus élevé, tandis que dans l'autre, c'est le violet. Ces deux arcs sont dus aux actions combinées de la réfraction, de la décomposition et de la réflexion de la lumière dans les gouttes de pluie; ils ne se montrent que lorsque les rayons incidents font un certain angle avec les rayons émergents.

Antoine de Dominis est le premier qui ait essayé de donner une théorie rationnelle de l'arc-en-ciel. Il indiqua de quelle manière les différentes inflexions de la lumière devaient avoir lieu dans les gouttes de pluie; mais sa détermination n'étant pas exacte relativement à l'arc extérieur, Descartes fit voir l'erreur, et traça d'une manière plus précise la marche des rayons. Newton, ayant repris l'explication du phénomène, y ajouta le degré de perfection dont elle manquait pour être complète. Nous n'entrerons dans aucun détail à cet égard, en raison des développements étendus que nous serions obligé de donner pour nous faire comprendre; nous dirons seulement que les

causes de l'arc-en-ciel sont tellement connues, que l'on peut déterminer par le calcul, la position et l'étendue de chacune des bandes colorées dont il se compose; que toutes les couleurs se trouvent sur des surfaces coniques plus ou moins ouvertes, qui ont toutes pour axe commun la ligne menée par le centre du soleil et l'œil de l'observateur; que le cône du violet est à l'intérieur, faisant avec l'axe un angle de 40° 17′; le cône du rouge à l'extérieur, faisant avec l'axe un angle de 42° 1′; que l'étendue de l'arc coloré dépend de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon.

Les halos sont des couronnes brillantes et ordinairement colorées qui entourent quelquefois le disque du soleil ou de la lune, qui en est le centre. L'espace compris entre les bords de l'astre et l'intérieur des cercles lumineux, est d'un gris plus intense ou d'un bleu plus foncé que la couleur de l'atmosphère. Quelquefois on observe un second halo extérieur au premier; ce phénomène a attiré l'attention d'un grand nombre de physiciens, et en particulier de Descartes, d'Huyghens, Mariotte, etc., etc. Descartes pensait qu'il était dû au passage des rayons lumineux dans certaines petites étoiles qui existent dans la neige et deviennent transparentes quand la chaleur commence à les fondre. La lumière, en traversant deux rangées de petites *étoiles*, produirait la seconde couronne. Huyghens substitua aux petites étoiles des globules d'eau ou de glace ayant au centre un noyau opaque formé d'une espèce de grésil.

Mariotte supposa que le halo devait être attribué à la forme des petites aiguilles transparentes et prismatiques de la neige; cette hypothèse gagne à l'examen, comme nous le verrons. Enfin, M. Arago a fait une observation qui doit être prise en considération dans l'explication que l'on veut donner des halos; cette observation prouve en effet que la lumière des halos est de la lumière réfractée, ce qui conduit à admettre que le phénomène est dû à la présence de particules glacées dans les hautes régions de l'atmosphère.

Les parhélies sont des faux soleils, images du soleil véritable, qui se montrent quelquefois sur l'horizon à la même hauteur que cet astre, et qui sont toujours unis les uns aux autres par un cercle blanc pareillement horizontal, dont le pôle est au zénith. Ce cercle suit le mouvement apparent du soleil. Les images du soleil qui paraissent sur le cercle, du même côté que le soleil, présentent les couleurs de l'arc-en-ciel, et quelquefois le cercle lui-même est coloré dans la partie qui les avoisine; les images situées du côté opposé sont toujours incolores; celles-ci doivent être produites par réflexion, ainsi que le

grand cercle et les autres par réfraction. Pour compléter la description du phénomène, nous dirons que lorsqu'il se produit, on voit ordinairement autour du soleil une ou plusieurs couronnes circulaires concentriques, qui offrent les couleurs de l'arc-en-ciel, et quelquefois sur ces couronnes ou sur les points du grand cercle, d'autres linéaments dorés pareils, et même des arcs tout entiers.

Huyghens a essayé de donner une explication des parhélies en s'appuyant sur l'existence dans l'atmosphère de cylindres de grêle, renfermant un noyau intérieur neigeux, opaque, pareillement cylindrique, et dont les extrémités sont arrondies; nous ne pouvons suivre la marche de la lumière dans ces corpuscules de forme déterminée, sans entrer dans des détails qui donneraient trop d'étendue à cette analyse.

Propriétés calorifiques, chimiques et phosphorogéniques de la lumière.

Nous avons encore à mentionner quatre propriétés importantes que ne possèdent pas au même degré toutes les parties du spectre : les propriétés éclairantes, les propriétés calorifiques, les propriétés chimiques et les propriétés phosphorogéniques.

Herschel a reconnu que le maximum de lumière se trouvait dans les rayons jaunes et verts, et qu'il diminuait jusqu'au rouge et au violet, où se trouve le minimum. Newton avait trouvé des résultats à peu près semblables.

Les propriétés calorifiques du spectre solaire paraissent avoir été étudiées la première fois par Leslie, qui annonça que l'action calorifique allait en augmentant du violet au rouge. M. Bérard fixa le maximum dans le rouge; Herschel dans la bande obscure qui le suit. M. Seebeck, en 1828, observa que la position du maximum variait avec la nature du prisme réfringent; M. Melloni annonça que ce maximum était d'autant plus écarté du jaune vers le rouge, que la matière du prisme était plus diathermane, et qu'il y avait un spectre calorifique comme un spectre lumineux.

Quant aux propriétés chimiques des rayons colorés, elles ont attiré depuis longtemps l'attention des physiciens et des chimistes. On connaissait, dès 1556, la propriété que possède la lumière solaire de réagir chimiquement sur divers composés, car on avait remarqué que l'argent corné naturel (chlorure d'argent) extrait de la terre brunissait à la lumière; mais ce fut Schéele qui, le premier, analysa cette action en étudiant l'action des différentes parties du spectre sur un

papier enduit de chlorure d'argent; il reconnut que l'effet était plus marqué dans les rayons violets que dans les autres.

En 1722, Petit montra que les dissolutions de salpêtre et de sel ammoniac exposées au soleil donnaient, en s'évaporant, des végétations plus belles qu'à l'ombre; Beckman reconnut qu'en exposant du phosphore à la lumière solaire, dans l'azote ou d'autres gaz, il se déposait, sur les parois du vase, une poudre variant de couleur d'un milieu à l'autre, tandis qu'à l'ombre il ne se produisait aucun effet.

Wollaston et Ritter, en reprenant l'expérience de Schèele, montrèrent que la partie impressionnée s'étendait non-seulement à travers l'espace occupé par le violet, mais encore à un degré égal, à pareille distance environ au delà du spectre visible : Wollaston en tira la conséquence que les effets produits devaient être attribués non à des rayons perceptibles à la rétine, mais à d'autres rayons invisibles qui les accompagnent et qui sont plus réfrangibles qu'eux. Diverses substances impressionnables, soumises à l'action des rayons chimiques du spectre, ont conduit à des résultats intéressants.

MM. Gay-Lussac et Thénard découvrirent l'action bien remarquable de la lumière solaire de l'hydrogène sur le chlore; un grand nombre d'autres faits que nous ne mentionnerons pas ici, *avaient* démontré que la lumière solaire, dans certains cas, agissait comme force chimique.

Lorsqu'on examine l'action du spectre solaire sur différentes substances impressionnables, on reconnaît que ce ne sont pas les mêmes portions du spectre dans lesquelles s'exercent les actions chimiques, ou du moins que l'étendue du spectre chimique, pour chaque substance, est différente. Pour une même substance impressionnable, il change peu avec la nature du prisme; mais si l'on considère le spectre formé par la réfraction d'un faisceau de rayons solaires à travers un prisme de flint-glass, on remarque que, pour le bromure d'argent, le chlorure d'argent, l'iodure d'argent, et, en général, pour la plupart des sels d'argent, l'action s'étend du bleu jusqu'au delà du violet, à une distance au moins égale à la moitié du spectre. Si l'on emploie l'action chimique de l'acide chromique sur les matières organiques, le spectre chimique s'étend depuis le milieu du vert jusqu'à quelque distance de l'extrême violet.

Dans quelques circonstances, la lumière est accompagnée de deux sortes de rayons, les uns produisant une réaction, et les autres détruisant cette réaction : l'action de la lumière sur la résine de gaïac en est un exemple. Cette résine bleuit par l'action de rayons chimiques

situés dans la partie la plus réfrangible du spectre lumineux, et même au delà; redevient jaunâtre, une fois qu'elle a été bleuie, dans les rayons les moins réfrangibles ou dans le rouge. On avait pensé d'abord que, dans ce cas, la chaleur agissait seule; mais M. Herschel a montré que le maximum d'action ne correspondait point au maximum de température; différents oxydes se comportent comme la résine de gaïac. Il en est de même de l'action d'un iodure alcalin sur un sel d'argent noirci; on sait que lorsqu'une solution d'iodure contient beaucoup de ce sel, tout le sel d'argent noirci, ou du moins tout l'argent réduit, se change promptement en iodure, même sans le secours des rayons chimiques. Mais quand la solution d'iodure est faible, le papier ne blanchit que sous l'action de la lumière; et on peut voir, d'après M. Herschel, que, quand la couche d'iodure est très-faible sur un papier préparé avec un sel d'argent et noirci antérieurement, le papier blanchit dans les rayons les plus réfrangibles, et noircit davantage dans la partie la moins réfrangible du spectre solaire.

M. Edmond Becquerel a découvert une autre action qui met en évidence une nouvelle propriété de la lumière sur les sels d'argent en général.

« A partir de la limite d'action du spectre chimique ordinaire qui « agit sur ce sel, jusqu'au rouge, il existe des rayons chimiques dont « la seule fonction est de continuer une réaction chimique com- « mencée. Si, par exemple, on opère avec l'iodure ou le bromure « d'argent, on a un spectre chimique qui s'étend, en général, depuis « le milieu du bleu jusqu'au delà du violet. » Ce spectre particulier est dû à l'action de rayons que M. Edmond a nommés *continuateurs*, attendu que leur action ne se manifeste que lorsque le sel a été soumis préalablement à l'action des premiers.

D'après ce qui précède, on voit que les effets chimiques sont produits par des rayons qui accompagnent les rayons lumineux et qui, comme ces derniers, sont soumis aux mêmes lois physiques de réflexion, de réfraction, de polarisation et d'interférence. Ces rayons, que l'on a nommés *rayons chimiques*, sont répartis dans tout le spectre; et, suivant telle ou telle substance impressionnable, le spectre chimique s'étend depuis telle partie réfrangible jusqu'à telle autre.

M. Edmond Becquerel a publié tout récemment un travail, dans lequel il établit que les différents spectres chimiques qui agissent sur diverses substances impressionnables, ont les mêmes raies que le

spectre lumineux, et qu'au delà de l'extrémité du violet, où l'on ne peut en distinguer que très-peu dans le spectre lumineux, le spectre chimique présente un grand nombre de raies; la partie occupée par ces dernières est d'une étendue d'environ moitié de la longueur du spectre. Ces raies ont été dessinées par M. Ed. Becquerel, qui a déterminé leurs rapports. On doit conclure de là que la même cause qui produit l'absorption de certains espaces lumineux, produit également l'absorption des espaces correspondants des rayons chimiques.

La lumière renferme aussi des rayons qui possèdent le pouvoir phosphorogénique. M. Ed. Becquerel, en analysant l'action du spectre sur les phosphores de Bologne et de Canton (sulfures de barium et de calcium) qui deviennent lumineux dans l'obscurité, après leur exposition préalable à la lumière solaire, a reconnu que pour le sulfure de calcium, le spectre phosphorogénique qui s'étend depuis l'indigo jusque bien au delà du violet, avait deux maxima d'intensité, l'un dans le violet, l'autre au delà : le spectre qui agit sur le sulfure de barium, a la même étendue à peu près, mais il n'a qu'un maximum situé au delà du violet. M. Ed. Becquerel a trouvé, en outre, qu'à partir de l'indigo jusqu'au delà du rouge, il y avait des rayons qui détruisaient la phosphorescence, lesquels n'avaient pas encore été observés : il a démontré aussi que le spectre phosphorogénique avait les mêmes raies que les spectres des autres rayonnements.

De la dispersion.

Quand on réfracte la lumière dans des prismes de nature différente, on trouve que les diverses couleurs, quoique disposées dans le même ordre, n'occupent pas les mêmes longueurs proportionnelles. Ce phénomène se rattache aux grandeurs des indices de réfraction correspondant à chaque couleur. On a appelé *dispersion* la différence des indices de réfraction du violet et du rouge pour un prisme de même substance. Ainsi, une substance est d'autant plus dispersive que cette différence est plus grande. On a appelé *pouvoir dispersif* le quotient de la division de la dispersion par l'indice moyen de réfraction, celui du rayon jaune, diminué de l'unité.

De l'achromatisme.

Quand un faisceau de rayons solaires tombe sur une lentille, les rayons diversement colorés, à cause de la différence de réfrangibilité, convergent vers des points différents de l'axe, et produisent ainsi des foyers colorés. C'est à cette diffusion de couleurs, dans les

images formées par les lentilles, qu'on a donné le nom d'*aberration de réfrangibilité*, que l'on corrige au moyen de l'achromatisme; ainsi, des lentilles sont achromatiques quand elles forment à leur foyer des images incolores.

Newton n'avait mesuré la dispersion que dans le cas du passage de la lumière, de l'air, dans le verre et dans l'eau; et comme, dans ces deux cas, le rapport de réfrangibilité des rayons extrêmes était sensiblement le même, il en avait conclu que ce rapport existait également pour toutes les substances, et que, dès lors, le problème de l'achromatisme était impossible à résoudre. Euler répondit qu'il ne pouvait en être ainsi, attendu que le cristallin était achromatique. Clairaut et d'Alembert s'occupèrent également de la question. En 1733, Hall construisit des lunettes achromatiques sans faire connaître son procédé; tandis que Jean Dollond, en 1757, fit la même découverte qu'il rendit publique. Il construisit une lentille à peu près achromatique avec une lentille biconvexe en crown-glass, et une lentille biconcave en flint-glass; par cet arrangement, l'achromatisme était imparfait, puisque l'application de deux verres n'ayant pas le même pouvoir réfringent, rend seulement parallèles deux des rayons du spectre. Si l'on voulait obtenir une image complétement blanche, il faudrait avoir une lentille composée de sept verres, ayant des indices de réfraction différents. Mais comme les variations de réfrangibilité présentent peu de différence, il s'ensuit qu'en rendant parallèles, après leur émergence, les rayons qui se trouvent à la limite du spectre, les autres le sont sensiblement.

M. Amici a voulu construire des lentilles composées de plusieurs autres superposées; mais il n'a obtenu que des images peu distinctes.

Rochon a construit un appareil nommé *diasporamètre*, qui sert à achromatiser un prisme quelconque, en déterminant l'angle qu'il faut donner à un second prisme, ayant un autre indice de réfraction et que l'on fait coïncider avec le premier.

VII. DE LA VISION.

Newton avança le premier que les rayons lumineux se rendent jusqu'au fond de l'œil en traversant toutes les parties dont celui-ci est composé, et communiquent un ébranlement au nerf optique, par l'intermédiaire de la rétine, d'où résulte la sensation de la lumière.

Descartes admit, comme dans la théorie des ondulations, que le corps lumineux transmet les mouvements vibratoires au nerf opti-

9.

que, à l'aide du principe subtil qui pénètre tous les corps. L'explication du phénomène de la vision repose donc sur la connaissance parfaite de la structure de l'œil; mais cette structure est tellement complexe qu'il nous est impossible d'en donner une analyse dans cette notice historique, ni d'exposer même succinctement le phénomène physique de la vision; nous dirons seulement qu'il paraît être une conséquence des lois de la réfraction, du pouvoir des lentilles et de la structure de l'œil. En effet, quand des rayons émanés des corps tombent sur la cornée transparente, ils la traversent en convergeant; les rayons qui ont trop d'obliquité sont rejetés par l'iris, membrane opaque, variable de couleur, située derrière la cornée transparente, et qui est percée d'une petite ouverture circulaire nommée *pupille*, susceptible de se contracter et de se dilater. Les rayons qui ont traversé la pupille, convergent de nouveau en traversant le cristallin, corps lenticulaire solide, transparent et achromatique, situé derrière la pupille, et viennent former une image renversée sur la rétine, membrane mince, tapissant le fond de l'œil, et formée de l'épanouissement du nerf optique sur la choroïde, membrane qui recouvre intérieurement la cornée opaque. Ces diverses parties, ou les espaces qui les séparent, sont remplis de liquides jouant un grand rôle dans le phénomène de la vision, en raison de leur pouvoir réfringent; entre la cornée transparente et le cristallin se trouve l'humeur aqueuse; l'espace compris entre le cristallin et le fond de l'œil est rempli de l'humeur vitrée.

La lumière éprouve une telle action en traversant l'œil, qu'elle vient peindre les objets extérieurs sur la rétine, sans qu'ils soient environnés d'auréoles de diverses couleurs, ni que la netteté des images soit dépendante de la distance des objets. Mais nous ne pouvons expliquer encore tous ces merveilleux effets, car il faudrait pour cela que nous connussions parfaitement les indices de réfraction, les puissances dispersives et les courbures de toutes les matières que la lumière traverse depuis son entrée dans l'œil jusqu'à la rétine qui en transmet la sensation au cerveau, par l'intermédiaire du nerf optique.

Une foule de questions sur la vision, dont quelques-unes n'ont pu être résolues que par des hypothèses, ont beaucoup occupé les physiciens; nous mentionnerons seulement ici les principales.

Comment l'œil s'accommode-t-il aux distances?

Comment juge-t-on de la couleur, de la forme, de la situation et de la grandeur des objets?

Avec les deux yeux, pourquoi ne voit-on qu'un objet?

Enfin, le mécanisme de l'œil a permis d'expliquer certains accidents de la vue, tels que le presbytisme, ou vue trop longue, et le myopisme, ou vue trop courte; ainsi que cet autre phénomène qui ne permet plus que de voir la moitié des objets.

VIII. DES INSTRUMENTS D'OPTIQUE.

Les propriétés des lentilles ont été mises à profit pour la construction d'une foule d'instruments d'optique qui rendent de grands services à l'astronomie, aux sciences naturelles, à la physique et aux arts, tels que les microscopes, lunettes, etc., etc.

Des microscopes.

Les microscopes sont simples ou composés. Les microscopes simples sont des loupes ou lentilles convexes, convenablement disposées, qui servent à grossir les objets; depuis longtemps cet instrument est connu.

Le microscope composé est formé au moins de deux lentilles convexes, dont l'une, qui sert d'objectif, est à très-court foyer, et dont l'autre, qui sert d'oculaire, est à plus long foyer. Les objets soumis à l'expérience sont placés un peu au delà de la distance focale principale de l'objectif; les images réelles et amplifiées sont regardées, derrière ce dernier, avec l'oculaire qui fait fonction de loupe. Ce microscope est dioptrique, catoptrique, ou catadioptrique, suivant que les amplifications sont produites par la réfraction, la réflexion, ou par la réflexion et la réfraction réunies. Le premier est le plus en usage.

On ne peut préciser l'époque de l'invention du microscope composé; on sait seulement que Galilée en envoya un, en 1612, à Sigismond, roi de Pologne, et que Drebbel expérimentait à Londres, en 1619, avec un appareil semblable. Depuis lors, on n'a cessé de le perfectionner, soit en donnant plus de régularité aux lentilles, soit en éclairant et disposant plus convenablement les objets, ou en donnant à l'instrument une position horizontale, au lieu de la position verticale qui était gênante pour l'observateur. M. Amici, qui est l'auteur du dernier perfectionnement, a placé une glace inclinée à 45° sur l'axe, laquelle réfléchit les objets dans un microscope horizontal; mais l'emploi des lentilles achromatiques dans le microscope ouvrit une nouvelle ère à cet instrument, puisque l'on peut voir les objets que l'on veut étudier, nets et sans couleur. Charles, le docteur Brewster, Frauenhoffer, Selligues, Vincent et Ch. Chevalier ont con-

tribué, chacun de leur côté, à la construction des lentilles achromatiques servant d'objectif. Les lentilles généralement adoptées aujourd'hui sont celles de M. Amici; elles se composent chacune de trois lentilles achromatiques de $13^{m},535$ de foyer : on se sert en même temps d'un oculaire achromatique.

Les dimensions absolues des corps ont été mesurées à l'aide du *micromètre,* appareil composé d'une lame de verre sur laquelle un millimètre est divisé en 100, 200 et 300 parties. En plaçant le corps sur la lame, de manière à voir en même temps l'objet et la division, il est facile ensuite de déterminer les dimensions cherchées.

Le microscope solaire, à l'aide duquel on obtient le plus fort grossissement, a été inventé, en 1745, par le docteur Lieber Kuhn. L'objet transparent que l'on veut examiner est placé très-près au delà du foyer d'une lentille objective, et au foyer d'une autre lentille sur laquelle un miroir plan projette parallèlement à son axe les rayons solaires. L'objet étant fortement éclairé, projette son image sur un tableau blanc placé dans une chambre noire : cet appareil est utile dans quelques recherches de physique et d'anatomie.

Des lunettes.

L'invention des lunettes date, dit-on, de la fin du XIIIe siècle. Les uns l'attribuent à Roger Bacon, les autres à un Florentin, nommé Salvino degli' Armati, mort en 1317, ou à Alessandro di Spina, mort en 1313, puis à Jean-Baptiste Porta, autant que l'on peut en juger par ce passage de sa *Magie naturelle,* imprimée en 1549 :

« Pourvu que vous sachiez la manière de joindre les deux verres, « soit le concave, soit le convexe, vous verrez également les objets « proches et éloignés, plus grands et même plus distinctement qu'ils « ne paraissent au naturel. » Néanmoins, ce fut Jacques Métius, fils d'un ouvrier d'Alemaer, qui, en réunissant deux verres, l'un concave, l'autre convexe, vit les objets éloignés plus grands et plus distincts. Cette découverte se répandit rapidement, et Galilée, comme nous l'avons dit déjà, construisit une lunette très-longue avec deux verres, à l'aide de laquelle il put reconnaître les satellites de Jupiter, les taches du soleil. (*Nuncius sidereus,* 1610.)

Descartes eut l'idée de prendre pour oculaire un verre convexe; mais il n'en fit aucun usage; ce fut Képler qui s'en servit le premier. Cette lunette a été décrite par lui dans sa *Dioptrique*, en 1611; mais il paraît qu'elle ne fut exécutée que vingt ou trente ans après, par le P. Scheiner (*Rosa ursina*, 1650).

En 1659, Huyghens mit un micromètre au foyer de l'objectif, à l'aide duquel il mesura le diamètre des planètes.

Les lunettes à deux verres convexes montraient les objets renversés ; pour les voir dans leur position naturelle, on imagina la lunette terrestre, composée de quatre verres convexes.

A cette époque on ne connaissait pas encore les verres achromatiques pour corriger l'aberration de réfrangibilité qui produisait des couleurs autour des corps. Newton y suppléa à l'aide du télescope. Dans cet instrument les objets sont réfléchis sur un miroir concave, et les rayons sont reçus sur une petite glace plane inclinée de 45° sur l'axe ; de sorte que les rayons émergeant perpendiculairement à l'axe sont perçus à l'aide d'une lentille biconvexe. Ce télescope présentant des difficultés pour l'observation, Grégory et Cassegrain y firent une modification importante. En 1663, le premier remplaça le petit miroir plan par un autre petit miroir concave, puis plaça l'oculaire dans une ouverture pratiquée au centre du grand miroir concave : avec ce télescope on put observer de même qu'avec des lunettes. Cassegrain remplaça le petit miroir concave par un petit miroir convexe, placé de manière à recevoir les rayons avant qu'ils eussent formé l'image réelle de l'objet. Par ce moyen, les rayons étaient non-seulement réfléchis, mais leur convergence se trouvait diminuée, et l'image réelle et renversée venait se former au même lieu que la seconde image du télescope de Grégory ; là elle se trouvait reçue sur l'oculaire.

La découverte des oculaires et des objectifs achromatiques fit renoncer à l'usage des télescopes dans les observations astronomiques, et l'on reprit alors les lunettes. Campani et Ramsden formèrent des oculaires achromatiques, en remplaçant l'oculaire biconvexe par deux lentilles plan-convexes séparées l'une de l'autre ; dans l'oculaire de Campani, les deux courbures sont en sens inverse ; dans celui de Ramsden, elles sont dans le même sens.

Tous les efforts des opticiens tendent à obtenir d'excellents objectifs ; car une fois que la première image est bien achromatique, nette et vivement éclairée, on n'éprouve aucune difficulté pour construire des oculaires qui amplifient et redressent cette image. Pour avoir un grossissement de mille fois, il faudrait un objectif achromatique de plus d'un pied d'ouverture, ce qui offre de grandes difficultés dans la fabrication. Néanmoins, l'astronomie doit déjà à MM. Cauchois et Lerebours des objectifs de grande dimension.

Le mégascope, imaginé, vers 1780, par Charles, est destiné à re-

présenter des images réduites ou agrandies d'un tableau ou d'un bas-relief; il est éclairé comme le microscope solaire, et le principe de sa construction est le même que celui imaginé par le P. Kircher. La lanterne magique n'est autre que le mégascope portatif, dans lequel les objets transparents sont éclairés par une lumière artificielle. La fantasmagorie est encore le mégascope, dans lequel on fait varier les distances de l'objet et du tableau à la lentille convergente, de manière à changer la grandeur de l'image, qui, d'abord très-petite, s'agrandit peu à peu.

La chambre claire, ou *camera lucida*, a été imaginée par Wollaston pour tracer l'image d'un objet ou d'un paysage. Elle se compose d'un prisme quadrilatère en verre, dont un des angles dièdres est droit, les deux adjacents plus petits et l'opposé plus grand. M. Amici y a fait diverses modifications pour que l'œil, destiné à voir en même temps dans le prisme et sur le papier, soit maintenu dans une position fixe.

En 1560, Jean-Baptiste Porta remarqua le premier les effets de la chambre noire, qui, pendant bien des années, ne servit qu'à dessiner des paysages et à faire quelques expériences d'optique; elle a reçu aujourd'hui une application importante, par suite de la découverte de MM. Niepce et Daguerre. Dans sa construction la plus simple, la chambre noire se compose d'un verre convergent fixé dans l'ouverture du volet d'une chambre complétement fermée. En traversant la lentille, les rayons émanés des objets extérieurs viennent représenter renversés ces objets sur une feuille de papier convenablement placée; pour les redresser et les amener à la portée de la vue, on dispose convenablement un miroir étamé, en dehors et en avant de la lentille. Les effets de la chambre noire servent à donner une idée de la manière dont l'image des objets extérieurs se peint sur la rétine.

IX. DE LA DIFFRACTION ET DES INTERFÉRENCES DE LA LUMIÈRE.

Lorsqu'on reçoit, dans une chambre noire, un faisceau de lumière solaire réfléchi horizontalement, après lui avoir fait traverser une lentille à court foyer placée à l'ouverture des volets, si l'on place, à quelque distance de ce foyer, un écran, pour intercepter une partie du cône de lumière, et que l'on reçoive l'autre sur une glace légèrement dépolie par derrière, on voit que la trace de l'ombre géométrique n'est pas réellement la séparation de l'ombre et de la lumière. Du côté de l'écran, la glace est éclairée d'une lueur très-sensible,

qui s'affaiblit continuellement jusqu'à une assez grande distance, tandis que de l'autre côté on aperçoit une alternative de franges obscures et lumineuses. Ce phénomène se produit encore avec toutes les couleurs du spectre, mais avec cette particularité cependant, qu'en passant des rayons rouges aux rayons violets, les franges obscures et lumineuses diminuent graduellement de largeur, et deviennent par conséquent de plus en plus serrées.

Grimaldi observa le premier les franges produites avec la lumière blanche (*Physico-mathesis de luminis coloribus et iride.* — Bologne, 1665, prop. I, n° 7 et suiv.). Elles ont été étudiées par divers physiciens; mais Fresnel est le premier qui ait mesuré avec une très-grande exactitude leur distance mutuelle. Ce phénomène, connu sous le nom de *phénomène de diffraction,* est encore produit avec de la lumière solaire non concentrée au foyer d'une lentille, et avec celle des étoiles.

On a étudié successivement les franges produites par des corps étroits et rectilignes, par des ouvertures étroites, par les bords des surfaces réfléchissantes. Newton essaya de les expliquer en supposant que les molécules lumineuses, en passant près des bords d'un corps quelconque, étaient détournées par un pouvoir répulsif, et que celles qui s'en approchaient le plus étaient plus détournées; de telle façon qu'il se formait des séries de caustiques, lesquelles, coupées par un plan, produisaient les franges observées. Cette explication rendait bien compte des franges extérieures, mais non des franges intérieures; ce fut une des objections que l'on opposa au système de l'émission.

Young expliqua le phénomène dans le système des ondulations, en supposant que les parties latérales de l'écran étaient autant de points lumineux qui réfléchissaient en tous sens la lumière qui tombait sur elles; que parmi tous ces rayons, il y en avait qui interféraient et produisaient les franges intérieures et extérieures. Il établit, vers 1801, une loi remarquable par sa simplicité et par l'étendue de ses applications. Voici les considérations qui le dirigèrent dans ces recherches:

Les vibrations de deux sons qui arrivent simultanément à l'oreille, produisent une impression de son ou le silence, selon qu'elles sont dans le même sens ou opposées dans leurs effets. Th. Young eut l'idée qu'il pourrait bien en être de même, si la lumière, comme le son, était le résultat d'un mouvement vibratoire; il vérifia par l'expérience le principe suivant:

« Si deux rayons qui émanent du même corps, au même instant, « arrivent au même point par des routes différentes, l'un doit ren-

« forcer ou détruire en totalité ou en partie les effets que l'autre pro-« duit, suivant que le trajet qu'ils ont parcouru est plus ou moins « long. » Il tira de là la conséquence que, dans quelques circonstances, ils produisent, en se superposant, des effets qui s'ajoutent ou se détruisent au point de former de l'obscurité, et constituent ce que l'on appelle une *interférence* : on dit que *deux rayons interfèrent*, quand ils agissent l'un sur l'autre. Fresnel, ayant pris avec son micromètre les mesures exactes des franges, trouva qu'il y avait une différence dans les longueurs observées et les longueurs déduites de l'explication de Young et donna une théorie complète des phénomènes de diffraction dans le système des ondulations en s'appuyant sur des faits qu'il a découverts. Il partit pour cela du principe fondamental d'Huyghens, savoir, que les vibrations d'une onde lumineuse dans chacun de ses points, peuvent être considérées comme les sources des mouvements élémentaires qu'y enverraient au même instant, en agissant isolément, toutes les parties de cette onde considérée dans une de ses positions quelconques antérieures.

Les interférences permettent d'expliquer les phénomènes qui ont lieu dans l'entre-croisement de tous les rayons qui éclairent une région quelconque de l'espace, rayons qui proviennent non-seulement de la lumière directe, mais encore de la lumière réfléchie ou réfractée plus ou moins obliquement. Entrons dans quelques détails sur les principes qui ont servi de bases à la théorie des interférences.

Grimaldi, dans l'ouvrage cité (Prop. II, p. 185), avait établi cette proposition : « Un corps naturellement lumineux peut devenir plus « obscur, lorsque l'on ajoute une nouvelle lumière à celle qu'il avait « déjà. » Dans l'expérience qu'il fit pour mettre cette proposition en évidence, il remarqua que lorsque de la lumière ajoutée à de la lumière produit de l'obscurité, si l'on vient à enlever une partie de la lumière éclairante, la surface obscure devient lumineuse.

En étudiant les modifications que les écrans transparents impriment aux franges, M. Arago fut conduit à admettre que les franges sont produites par le concours de rayons venant de deux bords opposés ; que l'action mutuelle des rayons dépend non-seulement d'une modification particulière qu'ils éprouvent aux limites du corps qu'ils rasent dans leur course, mais encore des divers milieux qu'ils ont traversés depuis leur source jusqu'au point où ils se rencontrent.

Fresnel a établi par l'expérience cette vérité, que deux rayons de lumière émanés d'une même source et qui se rencontrent sous une petite obliquité, exercent l'un sur l'autre une action mutuelle, de

manière à pouvoir alternativement se détruire en totalité ou s'ajouter et produire une lumière plus vive. Une expérience de M. Arago, en démontrant que la lumière se meut plus lentement dans le verre que dans l'air, vient à l'appui de la théorie des ondulations, car ce fait est en contradiction avec la théorie naturelle de la réfraction dans le système de l'émission.

On voit donc qu'un fait sur lequel repose le principe des interférences, soupçonné d'abord par Grimaldi, puis admis et posé en principe par Th. Young, a servi de base solide à la théorie des ondulations à laquelle le nom de Fresnel est à jamais attaché, en raison de ses belles découvertes. Les interférences seules n'ont pas suffi pour expliquer tous les phénomènes de diffraction; elles ont démontré que le fait principal était inconciliable avec le système de l'émission, et était au contraire une conséquence immédiate du système des ondulations. En effet, d'après ce système, lorsque deux rayons sont amenés en coïncidence, les vitesses se détruisent à chaque instant par la superposition de ces rayons, dont tous les points doivent rester en repos; d'où résulte de l'obscurité. Il en est de même si l'un des rayons est en retard ou en avance sur l'autre d'un nombre impair quelconque de demi-ondulations, ou si les rayons se rencontrent sous une petite obliquité. D'un autre côté, on a vu précédemment, et le fait est important, que la lumière se mouvait plus lentement dans le verre que dans l'air; cet effet rentre dans la théorie des ondulations : car on démontre que dans les substances transparentes et solides, les ondulations sont plus courtes que dans l'air, et que les longueurs d'ondulation sont proportionnelles au rapport du sinus d'incidence et de réfraction, c'est-à-dire, que l'indice de réfraction exprime le rapport des longueurs d'ondulations.

On a successivement fait rentrer dans la théorie des ondulations, les franges extérieures produites par le bord d'un écran, les franges produites par les petites ouvertures, celles produites par la réflexion sur les surfaces polies très-étroites et sur les surfaces irrégulièrement striées, et enfin les franges et les spectres produits par les réseaux. Frauenhoffer a observé ce dernier phénomène dans la circonstance suivante : Si l'on fait tomber sur une plaque de verre, sur laquelle on a tracé au diamant des lignes parallèles très-serrées, un rayon de lumière solaire, dans une chambre obscure, par une fente très-étroite, et que l'image soit reçue sur un écran, on observe avec une lunette les effets suivants : 1° l'image de la fente paraît éclairée, au milieu, d'une lumière blanche avec des bords très-tranchés, et, de chaque côté, les apparences sont symétriques; 2° de chaque côté de l'image de

la fente, il y a obscurité complète, puis après un spectre brillant, ayant le violet en dedans et le rouge en dehors; vient ensuite un espace obscur; 3° au delà, viennent à la suite les uns des autres, des spectres de diverses intensités; 4° ceux de ces spectres qui sont assez étalés et assez brillants font voir les mêmes raies noires que le spectre solaire direct. Frauenhoffer observa les lois expérimentales de ce phénomène, et M. Babinet a ramené son explication à la théorie des ondulations. Th. Young a tiré partie du phénomène des réseaux pour construire un instrument nommé *ériomètre*, avec lequel on compare entre elles les épaisseurs de fibres très-déliées de diverses substances, les diamètres des globules du sang, du lait, etc.

Des anneaux colorés produits par les lames minces et par les lames épaisses.

Les corps diaphanes réduits en lames minces, se présentent à nous colorés des nuances les plus vives, comme les boules de verre soufflé à la lampe, les bulles de savon, les lamelles de mica, en sont des exemples; l'air, les vapeurs et les gaz produisent des effets semblables qui ont été étudiés la première fois par Newton. L'expérience qui lui servit de guide fut faite sur une couche d'air comprise entre une plaque de verre plane et une lentille convexe; la couche d'air était d'une épaisseur variable depuis zéro jusqu'au plus grand écartement des deux verres. En faisant arriver en ce point un faisceau de rayons lumineux par réflexion, il vit autour une série d'anneaux lumineux présentant les couleurs du spectre; par transmission, les anneaux étaient formés des couleurs complémentaires; toutes les fois que le faisceau était de lumière homogène, les anneaux étaient alternativement obscurs et de la couleur de la lumière. Dans les différentes couleurs, les anneaux du même ordre étaient d'autant plus larges, que les couleurs qui les formaient étaient moins réfrangibles. Newton détermina les lois des épaisseurs correspondantes aux anneaux, et reconnut que les épaisseurs correspondantes aux anneaux brillants des rayons de la substance colorée, vus par réflexion, étaient entre eux comme la série 1, 3, 5, 7, etc., tandis que les épaisseurs correspondantes aux anneaux obscurs étaient comme les nombres 2, 4, 6, etc.; il découvrit aussi la loi des variations des épaisseurs, en substituant à l'air d'autres gaz, et reconnut que les épaisseurs correspondantes à un même anneau, dans différents milieux, étaient en raison inverse des indices de réfraction des milieux. Il détermina aussi les variations de l'épaisseur des anneaux suivant l'inclinaison du rayon incident.

Pour expliquer ces divers phénomènes, Newton imagina la théorie des accès de facile réflexion et de facile transmission. Il entendait par *accès de facile réflexion*, la disposition d'un même rayon à être réfléchi par différentes épaisseurs d'une même lame d'air ou de toute autre substance; et par *accès de facile transmission*, la disposition d'un rayon à être transmis par les épaisseurs intermédiaires. Le premier cas avait lieu toutes les fois que le rayon tombait sur une lame de quelque substance dont l'épaisseur était un des termes de la série 1, 3, 5, 7, etc., en prenant pour unité la plus petite épaisseur capable de réfléchir un rayon; le second cas, lorsque l'épaisseur de la lame qui le recevait était un des termes de la série 2, 4, 6, 8, etc. Au moyen de ce principe, Newton trouva les épaisseurs des lames minces qui produisent le phénomène des anneaux colorés.

Newton a étudié aussi les couleurs produites par les plaques épaisses. Pour les faire naître, il introduisit un rayon solaire dans une chambre noire, par une ouverture de quatre ou cinq millimètres de diamètre, et le fit tomber sur un miroir concave de verre étamé, de manière à le renvoyer exactement dans la direction de l'incidence; il distingua alors autour de l'ouverture, sur un carton placé à cet effet, une série d'anneaux très-éclatants. Si la lumière incidente était simple, les anneaux étaient alternativement sombres et de la couleur du rayon: il compta jusqu'à douze ou quinze de ces alternatives; avec la lumière blanche, il retrouva toutes les nuances des anneaux formés par les lames minces, et reconnut que ces anneaux ont la plus grande intensité, quand l'image réfléchie de l'ouverture tombe sur l'ouverture elle-même et lui est égale en grandeur. Newton, qui a fait ces expériences avec des miroirs de différents rayons ou de différentes épaisseurs, et qui a mesuré avec une grande précision les diamètres des divers anneaux, a établi les lois suivantes :

1° Dans une lumière homogène quelconque, les carrés des diamètres suivent, pour les anneaux brillants, la série des nombres pairs 0, 2, 4, 6, etc.; et pour les anneaux sombres, la série des nombres 1, 3, 5, 7, etc. 2° Avec un même miroir placé à la même distance, les diamètres des anneaux de même ordre, dans les différentes couleurs, vont en décroissant depuis le rouge jusqu'au violet, et leurs rapports sont les mêmes que pour les anneaux formés dans les lames minces. 3° Les diamètres des anneaux de même couleur et de même ordre, formés avec des miroirs de même rayon et de différente épaisseur, sont réciproquement proportionnels aux racines carrées des épaisseurs des miroirs.

Nous passerons sous silence divers phénomènes du même genre

observés par le duc de Chaulnes et par quelques autres physiciens, nous en tenant au fait général dont Newton a donné uue explication dans la théorie des accès.

Dans le système des ondulations, Fresnel a donné une explication directe des anneaux colorés, en s'appuyant sur les principes relatifs au sens du mouvement dans les ondes réfléchies, explication que nous rapportons textuellement, d'autant plus volontiers qu'ils renferment quelques-unes des vues métaphysiques qui servent de base à la théorie des ondulations.

« Lorsqu'un ébranlement se propage dans un milieu d'une élasticité et d'une densité uniforme, il ne revient jamais sur ses pas; et en se communiquant à des tranches nouvelles, il laisse les tranches précédentes dans un repos absolu. C'est ainsi qu'une bille d'ivoire, qui vient en frapper une autre, de masse égale, lui communique tout son mouvement et reste en repos après le choc. Lorsque la seconde bille a plus de masse que la première, la nouvelle vitesse dont celle-ci est animée la porte en sens contraire de son premier mouvement; et lorsque la seconde bille a moins de masse que la première, celle-ci continue à se mouvoir dans le même sens; ainsi, les nouvelles vitesses de la première bille, après le choc, sont de signes contraires dans les deux cas. Ceci peut aider à concevoir ce qui se passe lorsqu'une onde arrive à la surface de contact de deux milieux élastiques, de densité différente : la tranche infiniment mince du premier milieu qui touche au second, et que nous pouvons assimiler à la première bille, ne reste pas en repos après avoir mis en mouvement la tranche contiguë du second milieu, à cause de la différence de leur masse, et il y a réflexion; mais la nouvelle vitesse dont la tranche du premier milieu est animée après le choc, et qui se communique successivement aux tranches précédentes du même milieu, doit changer de signe, selon que la tranche du second milieu a plus ou moins de masse que celle du premier, c'est-à-dire, selon que celui-ci est moins dense ou plus dense que le second. Ce principe important, que M. Young a découvert par les considérations que nous venons d'exposer, résulte également des formules que M. Poisson a déduites d'une analyse savante et rigoureuse. Appliqué à la réflexion de la lumière, il nous apprend que, selon qu'une onde lumineuse est réfléchie au dedans ou en dehors du milieu le plus dense, la vitesse d'oscillation est positive ou négative. Ainsi, tous les mouvements oscillatoires correspondants seront de signes contraires dans les deux cas.

« Cela posé, revenons aux phénomènes des anneaux colorés, et supposons, pour simplifier les raisonnements, qu'on observe la lu-

mière réfléchie sous l'incidence perpendiculaire, ou du moins dans une direction qui s'en écarte très-peu ; considérons un des systèmes d'ondes envoyées par l'objet éclairant sur la première surface de la lame d'air, c'est-à-dire, sur la seconde surface du verre supérieur; ce que nous dirons de ce système d'ondes pourra s'appliquer à tous les autres. Au moment où il arrive à la surface de séparation du verre et de l'air, il éprouve une réflexion partielle qui diminue un peu l'intensité de la lumière transmise dans la lame d'air, et fait naître au dedans du premier verre un autre système d'ondes, dont l'intensité est, comme on sait, très-inférieure à celle de la lumière transmise; en sorte que celle-ci étant fort peu affaiblie par cette première réflexion, produit, en arrivant à la seconde surface de la lame d'air, un second système d'ondes réfléchies, d'une intensité presque égale à celle des ondes qui proviennent de la première réflexion ; voilà pourquoi leur interférence produit des couleurs si vives dans la lumière blanche, et des anneaux brillants et obscurs si prononcés dans une lumière homogène. Les deux surfaces de la lame d'air étant sensiblement parallèles dans le voisinage du point de contact où se forment les anneaux colorés, les deux systèmes d'ondes suivent la même route; mais celui qui était réfléchi à la seconde surface se trouvera en retard relativement à l'autre, et d'une quantité égale ou double de l'épaisseur de la lame d'air qu'il a traversée. Il faut remarquer, en outre, qu'il existe entre eux une autre différence, c'est que le premier a été réfléchi en *dedans* du verre ou du milieu le plus dense; tandis que l'autre l'a été en *dehors* du verre inférieur; d'où résulte, d'après le principe établi ci-dessus, une opposition dans les mouvements oscillatoires. Ainsi, lorsque, en raison de la différence des chemins parcourus, les deux systèmes d'ondes devraient être d'accord, c'est-à-dire, exécuter tous leurs mouvements oscillatoires dans le même sens, nous en conclurons qu'ils sont au contraire en discordance complète ; et réciproquement, lorsque la différence des chemins parcourus indiquera une discordance complète, nous en conclurons que leurs mouvements oscillatoires s'accordent parfaitement. Cela posé, il est aisé de déterminer la position des anneaux obscurs et brillants.

« Et d'abord, le point de contact, où l'épaisseur de la lame d'air est nulle, ne produisant aucune différence de marche entre les deux systèmes d'ondes, devrait établir un accord parfait entre leurs vibrations ; ainsi, puisqu'en raison de l'opposition de signe, c'est le contrepied qu'il faut prendre, leurs vibrations seront en discordance complète, et le point de contact, ou par réflexion, présentera une

tache noire. A mesure qu'on s'en éloigne, l'épaisseur de la lame d'air augmente. Arrêtons-nous au point où son épaisseur est égale à un quart d'ondulation; la différence des chemins parcourus sera une demi-ondulation, qui répond à une discordance complète, et par conquent il y aura accord parfait entre les deux systèmes d'ondes; ce sera donc le point le plus éclairé du premier anneau brillant. Lorsque l'épaisseur de la lame d'air sera la moitié d'une ondulation, la différence des chemins parcourus étaut égale à une ondulation qui répond à l'accord parfait, il y aura discordance complète, et ce point sera le milieu d'un anneau obscur.

« D'après l'expérience de M. Arago sur le déplacement qu'éprouvent les franges produites par l'interférence de deux faisceaux lumineux, lorsque l'un des deux a traversé une lame mince, nous avons vu que les ondulations lumineuses étaient raccourcies dans cette lame, suivant le rapport du sinus de réfraction au sinus d'incidence pour le passage de la lumière de l'air dans la lame. Ce principe est général et s'étend à tous les corps réfringents, de quelque nature qu'ils soient; ainsi, par exemple, la longueur d'ondulation de la lumière dans l'air est à la longueur d'ondulation dans l'eau comme le sinus de l'angle d'incidence des rayons qui passent *obliquement* de l'air daus l'eau est au sinus de leur angle de réfraction. Par conséquent, si l'on introduit de l'eau entre les deux verres en contact qui présentent des anneaux colorés, la lame d'air étant remplacée par une lame d'eau, dans laquelle les ondulations lumineuses deviennent plus courtes, suivant le rapport que nous venons d'énoncer, les épaisseurs de ces deux lames qui réfléchissent les mêmes anneaux, seront entre elles, dans le rapport du sinus d'incidence au sinns de réfraction pour le passage de la lumière de l'air dans l'eau. C'est précisément le résultat que Newton avait trouvé par l'observation en comparant les diamètres des auneaux produits dans les deux cas; d'où il déduisit, par le calcul, les épaisseurs correspondantes. Cette relation remarquable entre les phénomènes de la diffraction, de la réfraction et des anneaux colorés, qui ne se rattache en rien à l'hypothèse de l'émission, aurait pu être annoncée d'avance par la théorie des ondulations, d'après laquelle les sinus des angles d'incidence et de réfraction doivent être nécessairement proportionnels aux vitesses de propagation ou aux longueurs d'ondulation de la lumière dans les deux milieux.

« Après avoir rendu compte de la formation des anneaux réfléchis par l'interférence des rayons réfléchis à la première et à la seconde

surface de la lame d'air, M. Young a démontré que les anneaux beaucoup plus faibles que l'on voit par transmission, résultent de l'interférence des rayons transmis directement avec ceux qui ne l'ont été qu'après deux réflexions consécutives dans la lame mince, et qu'ils devaient être en conséquence complémentaires des anneaux réfléchis, conformément à l'expérience. Nous croyons inutile de donner cette explication, qui est semblable à la précédente; nous ferons seulement remarquer que l'extrême pâleur des anneaux transmis sous l'incidence perpendiculaire, tient à la grande différence d'intensité des deux systèmes d'ondes qui les produisent.

« Nous ne traiterons pas non plus des anneaux réfléchis sous des incidences obliques, et nous nous contenterons de dire que la théorie explique pourquoi leur diamètre augmente avec l'obliquité, et que la formule très-simple à laquelle elle conduit, représente les faits avec exactitude, du moins tant que les obliquités ne sont pas trop grandes. Lorsque les rayons qui pénètrent dans la lame d'air sont très-inclinés, les résultats du calcul ne s'accordent plus avec les mesures de Newton; mais il est probable que cette anomalie tient à ce que les lois ordinaires de la réfraction, d'après lesquelles la formule est calculée, éprouvent quelques modifications dans le passage très-oblique des rayons entre deux surfaces aussi rapprochées.

« Nous n'avons considéré jusqu'à présent que les anneaux produits par une lumière simple; mais il est aisé d'en conclure ce qui doit avoir lieu dans la lumière blanche, par des raisonnements analogues à ceux que nous avons déjà faits précédemment pour les franges de l'expérience des deux miroirs. On peut, d'ailleurs, trouver cette analyse du phénomène exposée avec le plus grand détail dans l'*Optique* de Newton, qui, le premier, a démontré que l'effet produit par la lumière blanche résultait toujours de la réunion des effets divers des rayons colorés dont elle se compose. »

Newton découvrit et observa les couleurs produites par les lames épaisses en faisant tomber sur un miroir concave de verre étamé un rayon solaire, de manière que le miroir le renvoie dans la même direction; on distingue autour de l'ouverture, sur un carton blanc disposé à cet effet, une série d'anneaux colorés très-brillants. Si la couleur incidente est simple, les anneaux sont alternativement sombres et de cette couleur; on en compte jusqu'à 120 ou 150. Avec la lumière blanche, les anneaux présentent les nuances des anneaux formés par les lames minces. Le duc de Chaulnes et Herschel ont remarqué que les anneaux étaient d'autant plus brillants que le mi-

roir était terni ou couvert d'une légère couche de poussière. Newton, dans sa théorie des accès, a donné une explication du phénomène qui n'est qu'une conséquence naturelle du système des ondulations. Nous passerons sous silence d'autres phénomènes de coloration qui dépendent des interférences, parce que nous n'avons en vue que de rapporter les faits généraux.

X. DE LA DOUBLE RÉFRACTION.

Un rayon de lumière éprouve la double réfraction dans un milieu, lorsqu'en pénétrant dans ce milieu il se produit deux faisceaux réfractés. Le phénomène de la double réfraction observé par Érasme, Bartolin, dans le spath d'Islande, a été étudié par Newton, puis par Huyghens, qui en détermina les lois et le rapporta à sa théorie des ondes, en admettant que le milieu éthéré contenu dans le cristal avait une constitution telle que ce milieu pouvait transmettre une impulsion plus promptement dans un sens que dans un autre.

Newton admit qu'un rayon de lumière, après son émergence d'un cristal, possède des propriétés dépendantes de l'espace environnant et qu'il conserve ensuite pendant tout le reste de son trajet. C'est à ces propriétés que l'on a rapporté tous les phénomènes de polarisation, comme nous le verrons bientôt.

Le phénomène de la double réfraction attira constamment l'attention des physiciens, sans qu'il en résultât aucune découverte importante. Wollaston donna une nouvelle impulsion à ces recherches, en vérifiant les lois de la double réfraction annoncée par Huyghens. Laplace leur appliqua la théorie de Newton ; et l'Institut de France crut devoir proposer ce sujet en prix, lequel fut décerné à Malus, qui découvrit la polarisation de la lumière en s'occupant de cette question. Nous allons rapporter maintenant les faits généraux. Dans les cristaux qui dérivent d'un polyèdre régulier, la réfraction est simple et suit la loi de Descartes; dans ceux dont la forme diffère du cube ou des autres polyèdres réguliers, il y a double réfraction.

Les cristaux doués de la double réfraction ou biréfringents ont été partagés en deux classes : cristaux à un axe, cristaux à deux axes ; attendu que dans ces cristaux il y a toujours une ou deux directions suivant laquelle, ou lesquelles, un rayon de lumière ne se bifurque jamais : ces directions ont été appelées *axes optiques.*

Le docteur Brewster a établi, comme loi générale, que dans les cristaux à un axe, l'axe de double réfraction coïncide toujours avec

l'axe optique. Dans la section principale de ces cristaux, le rayon ordinaire suit toujours la loi de Descartes comme dans toutes les positions; il en est de même du rayon extraordinaire; mais avec ce dernier, le rapport des sinus n'est plus le même. Dans une section perpendiculaire à l'axe, les rayons ordinaires et extraordinaires sont tous deux soumis à la loi de Descartes, et donnent naissance aux indices de réfraction, nommés *indice ordinaire* et *indice extraordinaire.*

M. Biot a, le premier, fait la comparaison de ces deux indices dans un grand nombre de cristaux, et il est parvenu à ce résultat remarquable, que l'indice ordinaire est tantôt plus grand, tantôt moindre; il a appelé les uns *cristaux répulsifs*, les autres *cristaux attractifs*. M. Brewster les a désignés sous la dénomination de *cristaux positifs*, *cristaux négatifs.*

Huyghens avait donné des constructions géométriques qui permettaient de construire un rayon réfracté, connaissant son incidence, soit qu'il se trouvât dans la section principale, soit qu'il fût dans la section perpendiculaire à l'axe, ou dans une position quelconque dans un cristal à un axe. Malus vérifia par une expérience ingénieuse les constructions de Huyghens. Fresnel découvrit par la théorie et démontra par l'expérience, que dans les cristaux à deux axes il n'y avait plus de rayon ordinaire, c'est-à-dire, que les deux rayons qui naissent de la division d'un rayon incident ne suivent, ni l'un ni l'autre, les lois générales de la réfraction. Il a trouvé, en appelant *ligne moyenne* et *ligne supplémentaire*, les lignes que divisent l'angle des deux axes et son supplément en deux parties égales, que dans une section perpendiculaire à la ligne moyenne un des rayons réfractés suit la loi ordinaire de la réfraction, et que, dans une section perpendiculaire à la ligne supplémentaire, l'autre suit la loi ordinaire de la réfraction.

Les lois générales de la double réfraction dans les cristaux à un axe et à deux axes ont été déterminées par l'analyse, et les résultats que l'on en a déduits s'accordent parfaitement avec ceux de l'expérience.

Le phénomène de la double réfraction a été employé pour mesurer de très-petits angles de cristaux. Rochon construisit à cet effet un appareil que l'on nomme *micromètre à double image* ou *lunette de Rochon*. Cet appareil est destiné à donner immédiatement l'angle sous lequel on voit un objet, et par conséquent la grandeur de l'objet lui-même, quand on connaît sa distance, et réciproquement. Il se compose d'une lunette et d'un système de deux prismes en cristal de

roche; dans l'un, la face qui regarde l'objet est taillée perpendiculairement à l'axe; et dans le second, les faces latérales sont parallèles à l'axe. Nous reviendrons sur la double réfraction en parlant de la polarisation de la lumière, dont nous allons nous occuper.

XI. POLARISATION.

Le phénomène de la double réfraction a conduit à la découverte d'une classe de faits qui ont montré que les rayons de lumière peuvent acquérir, par la réfraction et la réflexion, des propriétés particulières qui les distinguent des rayons parvenus directement des sources lumineuses. Ce fut Malus qui, en 1810, fit la découverte de cette classe de faits connue sous le nom de *polarisation de la lumière*, et qui ouvrit à l'optique une carrière immense par son étendue, par sa richesse, et dont les sciences chimiques et naturelles recevront de grands secours. Voici le fait fondamental : Un rayon lumineux, après une réflexion sur une glace de verre, sous un angle de 35° 25, jouit des propriétés suivantes : 1° de ne donner qu'une seule image en passant au travers d'un prisme biréfringent quand la section principale est parallèle ou perpendiculaire au plan de réflexion, tandis qu'il donne deux images plus ou moins intenses dans les autres positions.

2° Ce rayon n'éprouve aucune réflexion en tombant sur une seconde lame de verre sous le même angle de 35°, 25, quand le plan d'incidence sur cette seconde lame est perpendiculaire au plan d'incidence sur la première, tandis qu'il se réfléchit partiellement sous d'autres incidences.

3° Il est incapable de se transmettre perpendiculairement au travers d'une plaque de tourmaline dont l'axe est parallèle au plan de réflexion, tandis qu'il se transmet avec une certaine intensité à mesure que l'axe de la tourmaline approche d'être perpendiculaire au plan de réflexion.

A l'époque de cette découverte, le système de l'émission était en faveur, et le mot de *polarisation* rappelait ce que l'on supposait dans ce système, savoir : que les molécules lumineuses possédaient des pôles ; dans le rayon polarisé, les pôles semblables étaient rangés de la même manière; c'est pour ce motif que Malus appela *plan de polarisation* le plan suivant lequel était réfléchie la lumière qui se trouve polarisée par réflexion, et qui était censé renfermer les axes des molécules lumineuses.

Brewster, de son côté, trouva qu'un rayon pouvait se polariser par une suite de réflexions successives sur deux glaces, sous des incidences quelconques. Malus découvrit que la simple réfraction pouvait polariser un rayon lumineux ; qu'un rayon, en traversant une pile de glace, était complétement polarisé, et qu'il avait son maximum de polarisation quand le rayon tombait sur la première plaque, sous l'angle de polarisation. En étudiant la double réfraction dans ses rapports avec le phénomène de polarisation, Malus reconnut que les deux faisceaux, ordinaire et extraordinaire, que donne la lumière naturelle, en traversant la section principale d'un cristal, étaient l'un et l'autre polarisés, le premier dans le plan d'immergence, et le second perpendiculairement à ce plan. Enfin, on reconnut que lorsqu'une surface quelconque est éclairée par une vive lumière, parmi les rayons qu'elle réfléchit dans tous les sens, il s'en trouve qui sont polarisés dans un plan perpendiculaire au plan d'émergence. Mais il ne suffisait pas de découvrir un phénomène et de le décrire, il fallait encore trouver les lois auxquelles il est soumis; c'est ce que firent Malus et les physiciens qui s'élancèrent après lui dans la nouvelle carrière qu'il venait d'ouvrir.

On trouva d'abord que toutes les substances ne polarisaient pas la lumière sous le même angle; ainsi le verre polarise complétement la lumière par réflexion sous un angle d'environ 35°, le diamant sous un angle de 22°, etc. On employa plusieurs procédés pour déterminer cet angle avec exactitude : nous citerons particulièrement celui de M. Arago, avec lequel on fit un certain nombre de déterminations. Mais c'est à M. Brewster que la physique est redevable de la découverte de la loi admirable par sa simplicité, au moyen de laquelle on obtient l'angle de polarisation en fonction de l'indice de réfraction ; voici l'expression de cette loi :

La tangente de l'angle de polarisation avec la normale est égale à l'indice de réfraction. Cette loi peut se traduire en celle-ci : *L'angle de polarisation est celui sous lequel le rayon réfléchi est perpendiculaire au rayon réfracté.*

La lumière se polarise, non-seulement à la première surface des corps, mais encore dans l'intérieur de leur masse par la réflexion à leur seconde surface.

Après sa grande découverte, Malus avait donné une loi empirique pour déterminer l'intensité du rayon polarisé; mais il ne l'avait vérifiée que dans certaines circonstances; M. Arago fit cette vérification par des expériences directes. A l'aide de sa théorie, Fresnel retrouva la

même formule que Malus. Cette formule conduit à cette conséquence, qu'un faisceau de lumière naturelle peut être considéré comme composé de deux faisceaux d'égale intensité, et polarisés à angle droit; l'un ayant son plan de polarisation à droite du plan d'incidence, et l'autre à gauche. D'après la formule de Malus, l'intensité du rayon ordinaire est égale à l'intensité du rayon incident multiplié par le carré du cosinus de l'angle de la section principale du prisme avec le plan de polarisation, tandis que l'intensité du rayon extraordinaire est égale à l'intensité du rayon incident multiplié par le carré du sinus du même angle.

Dans la réflexion de la lumière, jusqu'à Fresnel, on n'avait pas encore déterminé la loi de l'intensité de la lumière réfléchie; on savait seulement que la quantité en augmentait avec l'obliquité de l'incidence, mais on ignorait quelles étaient les incidences correspondantes aux diverses intensités. Cette question a été résolue, à l'aide des phénomènes de polarisation, d'un côté par M. Arago, de l'autre par Fresnel, auquel on doit une formule qui permet, l'indice de réfraction d'une substance étant connu, de calculer les quantités de lumière que cette substance réfléchit sous une obliquité quelconque.

Quand un rayon de lumière polarisé se réfléchit sur une surface polie, sous diverses obliquités, la portion réfléchie se trouve encore polarisée; mais il arrive en général que son plan de polarisation change de direction; ce changement de direction a été appelé *mouvement du plan de polarisation*. C'est encore Fresnel qui donna le premier une formule pour exprimer ce mouvement.

Nous avons déjà dit que plusieurs réflexions successives produisaient une polarisation complète. M. Brewster a calculé la proportion de lumière qui, pour chaque incidence, devait paraître polarisée dans le plan de réflexion, et détermina enfin tous les effets des réflexions successives pour polariser la lumière. La réfraction peut aussi imprimer un mouvement au plan de polarisation, car Brewster analysa ces phénomènes au moyen d'une formule dont il a déduit la loi générale.

Dans la réflexion, le plan de polarisation se rapproche du plan d'incidence; dans la réfraction, c'est le contraire; il s'en éloigne de plus en plus, de sorte que l'on retombe sur le fait observé par Malus, savoir, que lorsqu'on fait tomber sur une plaque un rayon sous l'incidence de la polarisation, le rayon réfracté, de même que le rayon réfléchi, est polarisé, mais dans un plan perpendiculaire au premier.

De même que l'on avait déterminé la loi de la polarisation produite par des réflexions successives, de même aussi détermina-t-on celle de la polarisation produite par des réfractions successives. On a été ainsi conduit à cette loi simple de M. Arago, savoir, que *la quantité de lumière polarisée par réfraction est égale à la quantité de lumière polarisée par réflexion*. Suivant M. Brewster, cette loi est plus ou moins inexacte, quand l'angle que forme le rayon avec la normale s'écarte beaucoup de l'angle de polarisation complète.

Les rayons polarisés exercent-ils les uns sur les autres une action mutuelle, c'est-à-dire, jouissent-ils de la propriété d'interférer? Cette question a dû occuper naturellement les deux physiciens qui ont concouru à établir la théorie des interféreuces : nous voulons parler de MM. Fresnel et Arago, qui ont résolu la question de la manière la plus complète. Voici comment le premier expose le résultat de leurs recherches :

« En étudiant les interférences des rayons polarisés, nous avons trouvé, M. Arago et moi, qu'ils n'exercent plus d'influence les uns sur les autres, quand leurs plans de polarisation sont perpendiculaires, c'est-à-dire, qu'ils ne peuvent plus alors produire de franges, quoique toutes les conditions nécessaires à leur apparition, dans le cas ordinaire, soient d'ailleurs scrupuleusement remplies. Je citerai les trois principales expériences qui nous ont servi à établir ce fait, en commençant par celle qui appartient à M. Arago. Elle consiste à faire traverser aux deux faisceaux émanant du même point lumineux, et introduits par deux fentes parallèles, deux piles de lames transparentes très-minces, telles que celles de mica ou de verre soufflé, qu'on incline assez l'une et l'autre pour polariser presque complétement chacun des deux faisceaux, en ayant soin que les deux plans suivant lesquels on les incline soient perpendiculaires entre eux; alors on ne peut plus apercevoir de franges, quelque soin que l'on prenne d'ailleurs à compenser les différentes espèces de marche, en faisant varier très-lentement l'inclinaison d'une des piles; tandis que, lorsque les plans d'incidence des piles ne sont plus perpendiculaires entre eux, on parvient toujours à faire paraître les franges. A mesure que ces plans s'éloignent du parallélisme, les franges s'affaiblissent, et elles disparaissent tout à fait quand ils sont rectangulaires, si la polarisation des deux faisceaux a été assez complète. Il résulte de cette expérience, que les rayons polarisés suivant le même plan, s'influencent mutuellement, comme des rayons de lumière non modifiée; mais que cette influence diminue à mesure que les plans de polarisation s'écartent

l'un de l'autre, et devient nulle quand ils sont rectangulaires. »

Fresnel rapporte deux autres expériences qui conduisent aux mêmes conclusions; puis il cite une troisième expérience à l'appui des deux premières, et il ajoute :

« Il est donc complétement démontré, par les expériences que je viens de rapporter, que les rayons polarisés à angle droit ne peuvent exercer une influence sensible l'un sur l'autre; ou, en d'autres termes, que leur réunion produit toujours la même intensité de lumière, quelles que soient les différences de marche des deux systèmes d'onde qui interfèrent.

« Un autre fait remarquable, c'est qu'une fois qu'ils ont été polarisés suivant des directions rectangulaires, il ne suffit plus qu'ils soient ramenés à un plan commun de polarisation, pour qu'ils puissent donner des signes apparents de leur influence mutuelle. En effet, si dans l'expérience de M. Arago, ou celle que j'ai décrite ensuite, on fait passer les rayons sortis des deux fentes, qui sont polarisés à angle droit, au travers d'une pile de glaces inclinées, on n'aperçoit pas de franges, dans quelque direction que l'on tourne son plan d'incidence. Au lieu d'une pile, on peut employer un rhomboïde de spath calcaire; si l'on incline sa section principale de 45° sur les plans de polarisation des faisceaux incidents, de manière qu'elle divise en deux parties égales l'angle qu'ils font entre eux, chaque image contiendra la moitié de chaque faisceau; et ces deux moitiés, ayant le même plan de polarisation dans la même image, devraient y produire des franges, s'il suffisait de ramener les rayons à un plan commun de polarisation pour rétablir les effets apparents de leur influence mutuelle. Mais on ne peut jamais obtenir des franges par ce moyen, tant que les rayons n'ont pas été polarisés suivant un même plan, avant d'être divisés en deux faisceaux polarisés à angle droit.

« Lorsque la lumière a éprouvé cette polarisation préalable, l'interposition du rhomboïde fait reparaître les franges. La direction la plus avantageuse à donner au plan primitif de polarisation est celle qui divise en deux parties égales l'angle des plans rectangulaires, suivant lesquels les deux faisceaux sont polarisés en second lieu, parce qu'alors la lumière incidente se partage également entre eux. Supposons, pour fixer les idées, que le plan de la polarisation primitive soit horizontal; il faudra que les plans de la polarisation suivante, imprimée à chacun des deux faisceaux, soient inclinés de 45° sur le plan horizontal, l'un en dessus, l'autre en dessous, de sorte qu'ils restent perpendiculaires entre eux. On peut obtenir cette position rectangulaire, soit à

l'aide des deux petites piles employées dans l'expérience de M. Arago, soit avec deux lames, dont les axes sont disposés rectangulairement, soit enfin avec une seule lame cristallisée. Nous ne considérerons que ce dernier cas; les deux autres présentant des phénomènes absolument analogues.

« Pour partager la lumière en deux faisceaux qui se divisent sous un petit angle, et qui puissent ainsi faire naître des franges, l'appareil des deux miroirs est généralement préférable à l'écran percé de deux fentes, parce qu'il produit des franges plus brillantes; il a d'ailleurs ici l'avantage de donner immédiatement aux deux faisceaux la polarisation préalable nécessaire à notre expérience; il suffit pour cela que les deux miroirs soient en verre non étamé, et inclinés de 35° environ sur les rayons incidents; il faut avoir soin de les noircir par derrière pour détruire la seconde réflexion. On place près d'eux, dans le trajet des rayons réfléchis, et perpendiculairement à leur direction, une lame de sulfate de chaux ou de cristal de roche, parallèle à l'axe, d'un ou deux millimètres d'épaisseur, en inclinant la section principale de 45° sur le plan de la polarisation primitive, que nous avons supposé horizontal. L'appareil étant ainsi disposé, on ne verra qu'un seul groupe de franges au travers de la lame, comme avant son interposition, et il occupera la même position. Mais si l'on met devant la loupe une pile de glaces inclinées dans un sens horizontal ou vertical, on découvrira, de chaque côté du groupe central, un autre groupe de franges, qui en sera d'autant plus éloigné que la lame cristallisée sera plus épaisse. Remplace-t-on la pile de glaces par un rhomboïde de spath calcaire, dont la section principale est dirigée horizontalement ou verticalement, on voit dans chacune des deux images qu'il produit, les deux systèmes de franges additionnelles que l'interposition de la pile de glaces a fait naître, et il est à remarquer que ces deux images sont complémentaires l'une de l'autre, c'est-à-dire, que les bandes obscures de l'une répondent aux bandes brillantes de l'autre.

« Nous voyons dans cette expérience une nouvelle confirmation des principes démontrés par les précédentes. Les rayons qui ont éprouvé des réfractions de noms contraires ne peuvent s'influencer, parce que, sortant de la même lame, dans le cas que nous considérons maintenant, ils se trouvent polarisés suivant des directions rectangulaires; en conséquence, les groupes de droite et de gauche ne peuvent exister, à moins qu'on ne rétablisse l'influence mutuelle de ces rayons en les ramenant à un plan commun de polarisation; c'est ce que fait l'interposition de la pile de glaces ou du rhomboïde. Les franges ainsi pro-

duites sont d'autant plus prononcées, que les deux faisceaux de noms contraires qui concourent à leur formation sont plus égaux en intensité; et voilà pourquoi la direction de la section principale du rhomboïde, qui fait un angle de 45° avec l'axe de la lame, est la plus favorable à l'apparition des franges. Quand la section principale du rhomboïde est parallèle ou perpendiculaire à celle de la lame, les rayons réfractés ordinairement par la lame passent en entier dans une image, au lieu de se partager entre les deux, et tous les rayons extraordinaires passent dans l'autre image, en sorte qu'il ne peut plus y avoir interférence entre eux, et les groupes additionnels disparaissent; chaque image ne présente plus que les franges qui résultent de l'interférence des rayons de même nom, c'est-à-dire, celles qui composeront le groupe central.

« Ces deux groupes de franges additionnelles que présentait la lumière polarisée dans la première position du rhomboïde, fournissent un des moyens les plus précis de mesurer la double réfraction, et d'en étudier la loi. En effet, leur position excentrique tient à la différence de marche des rayons ordinaires et extraordinaires qui sont sortis de la lame; et l'on peut juger du nombre d'ondulations dont les rayons extraordinaires du faisceau de droite sont restés en arrière des rayons ordinaires de gauche, par le nombre de largeurs de franges comprises entre le milieu du groupe de droite et celui du groupe central. On détermine encore mieux cette différence de marche, en mesurant l'intervalle compris entre les milieux des deux groupes extrêmes, qui est le double de leur distance au milieu du groupe central. C'est la lumière blanche qu'il est le plus commode d'employer dans ces sortes d'observations; d'abord, parce qu'elle est plus vive, et, en second lieu, parce qu'elle rend la bande centrale de chaque groupe plus facile à reconnaître. Comparant ensuite l'épaisseur de la lame à la différence de marche observée, on en conclut le rapport des vitesses des rayons ordinaires et extraordinaires. »

Couleurs de la lumière polarisée.

En étudiant l'action de la lumière polarisée sur des corps doués de la double réfraction, peu de temps après la découverte de Malus, en 1811, M. Arago fut conduit à une classe de phénomènes des plus remarquables, et qui consiste en une série de couleurs les plus belles et les plus vives, semblables à celles que Newton avait observées dans des couches minces, gazeuses ou liquides, mais plus éclatantes et mieux développées. Ces couleurs se manifestent lorsque des subs-

tances douées de la double réfraction, en lames plus ou moins minces, sont traversées suivant des directions particulières par de la lumière polarisée. Une lame de mica, par exemple, est incolore et diaphane quand on la regarde à l'œil nu ; mais si, pour la regarder, on place devant l'œil un prisme biréfringent, on la voit en général prendre une teinte colorée, uniforme et brillante ; ce prisme la fait paraître double, et ses deux images colorées sont toujours d'une couleur complémentaire l'une de l'autre. Toutes les lames cristallisées présentent des phénomènes analogues, soit qu'elles proviennent d'un cristal biréfringent à un ou à deux axes ; mais il y a toujours une épaisseur au delà de laquelle tous les phénomènes de couleur disparaissent. A peine ce phénomène fut-il connu, que de toutes parts on se mit à l'œuvre pour l'étudier, en découvrir les diverses particularités, les lois et les applications. Nous citerons en France, Fresnel, MM. Biot et Arago ; en Angleterre, MM. Young, Wollaston, Brewster et Herschel ; en Allemagne, MM. Seebeck et Mitscherlich. L'étude des couleurs de la lumière polarisée a conduit MM. Biot, Brewster et Wollaston à une série de phénomènes très-remarquables, dépendant de la structure intime des corps.

Tout ce qui a été fait à cet égard peut être divisé en cinq parties :

1° Les teintes colorées des lames cristallisées ;

2° Les anneaux colorés des lames cristallisées ;

3° La polarisation circulaire ;

4° La couleur des corps irrégulièrement agrégés ;

5° L'absorption de la lumière polarisée.

On a dû naturellement attribuer à la polarisation les couleurs qui se développent ainsi ; car, on sait que la lumière bleue du ciel est plus ou moins polarisée dans les diverses régions, et même aux différentes heures de la journée. Quand on regarde un rayon solaire polarisé qui vient de traverser une lame doublement réfringente, très-mince, à travers un prisme biréfringent achromatisé, on observe que lorsque la section principale de la lame coïncide avec la section principale du prisme et avec le plan primitif de polarisation, il n'y a qu'une seule image qui est blanche ; c'est l'image ordinaire. Quand la section principale de la lame est perpendiculaire à la section principale du prisme, et au plan primitif de polarisation, il n'y a également qu'une seule image blanche, qui est l'image extraordinaire.

Dans toutes les positions intermédiaires il y a deux images, toujours colorées de la même nuance, et dont les couleurs sont toujours complémentaires l'une de l'autre. Quand la section principale du prisme

est perpendiculaire au plan primitif de polarisation, on observe des phénomènes analogues, mais les deux rayons changent de rôle.

En étudiant les teintes des lames cristallisées de même substance et d'épaisseur variable, M. Biot a reconnu que les mêmes périodes, c'est-à-dire, les lames de même substance et d'épaisseurs différentes donnaient, les unes le rouge du premier ordre, les autres celui du second, et qu'elles suivaient la série des nombres naturels 1, 2, 3.

En s'appuyant sur des hypothèses inhérentes au système de l'émission, M. Biot était parvenu à lier tous ces phénomènes par une théorie connue sous le nom de *théorie de polarisation mobile.* Elle fut vivement combattue par Fresnel, qui démontra que ses bases n'étaient pas admissibles, et qu'elles ne pouvaient expliquer exactement tous les faits. Pour fonder une autre théorie sur le système des ondulations, Fresnel commença par démontrer que le rayon polarisé se bifurquait dans l'intérieur de la lame cristallisée, puis que chaque rayon se bifurquait encore dans le prisme biréfringent, de sorte que les images vues dans ce dernier prisme étaient formées chacune de deux faisceaux polarisés; mais comme les éléments de chaque image n'avaient pas la même vitesse, il en résultait une avance ou un retard de l'un des faisceaux élémentaires sur l'autre, et par conséquent interférence entre quelques-uns des éléments des rayons, interférence qui produisait les couleurs obtenues. La duplication des lames donnait un moyen de développer les couleurs dans les cristaux où l'on ne pouvait en découvrir aucune par l'observation; si les couleurs naissaient sur la duplication parallèle, le cristal était désigné contraire au cristal négatif dont on avait fait usage : si elles naissaient par la duplication croisée, le cristal était de même signe.

En prenant une lame cristallisée d'un cristal à deux axes, il était facile de se convaincre que, sous l'incidence perpendiculaire, tous les phénomènes se produisaient autour de la ligne intermédiaire, d'après les mêmes lois qu'autour d'un axe dans les cristaux à deux axes. On pouvait donc reconnaître par ces phénomènes si une lame était ou non biréfringente.

Fresnel établit d'abord les formules générales qui donnent l'intensité de chaque espèce de lumière homogène dans les images ordinaire et extraordinaire en fonction de la longueur d'ondulations et de la différence des chemins parcourus par les rayons qui ont traversé la lame cristallisée. Ces formules démontrent la simplicité et la fécondité des principes qui ont servi à Fresnel à fonder la théorie des

couleurs des lames cristallisées; et l'on en tire les conséquences suivantes :

1° La somme des intensités des deux faisceaux reproduit l'iutensité primitive prise pour unité.

2° Sous l'incidence perpendiculaire, la différence des chemins parcourus est, dans tous les cristaux, proportionnelle à l'épaisseur, et, dans chaque cristal, elle dépend, en outre, de la différence de vitesse du rayon ordinaire et du rayon extraordinaire, ou des indices de réfraction correspoudauts à ces deux espèces de rayons. Dans un cristal où les Indices seraient presque égaux, il faudrait nne grande épaisseur pour obtenir, par exemple, le rouge du premier ordre, tandis que, pour obteuir la même nuance, il ue faudrait qu'une épaissenr très-petite si les ludices ordinaire et extraordinaire étalent d'habitude fort différents.

3° Quand la différence des chemlns parcourus est égale à un très-grand nombre d'oudulations, les images sont biauches, comme dans la théorie des lames minces, et par la même raison.

4° La condition nécessaire pour qu'il n'y ait pas de couleur dans les images, est évidemment que le terme qul varle avec la largeur des ondulations, soit nul, puisque alors les rayons de toutes les couleurs aurout des inteusités égaies, et produiront du blauc.

5° La condition nécessaire pour que ies images soient colorées des plus vives nuances est évidemment que le terme qui varie avec la longueur d'oudulation, atteigne son maximum.

6° Le plau de polarisation peut être facilement determlné d'une manière géuérale daus l'une et l'autre image.

Toutes ces couséquences, tirées des formuies, ont été confirmées par l'expérieuce. Ainsi, la théorie que Fresnel a donnée des couleurs des lames cristaliisées repose sur des principes en même temps simples et fécouds daus ieurs applications.

Anneaux colorés des lames cristallisées.

Lorsqu'un faisceau de lumière blanche polarisée traverse une lame d'un cristal doué de la double réfraction (de spath d'Islande, par exemple), taiiié perpendiculairement à l'axe, si l'on regarde avec une plaque de tourmaiine, on aperçoit une série d'anneaux ronds concentriques et très-vlvemeut colorés; les effets changent d'aspect avec ia position de la tourmaline. Quand l'axe de cette dernlère se trouve daus le plan primitif de polarisation, les anneaux sont traversés par une belle croix noire quil s'étend à une grande distance; au contraire,

la croix est blanche quand l'axe de la tourmaline est perpendiculaire au plan de polarisation.

En étudiant ce phénomène dans les cristaux à un axe, on a été conduit aux deux lois suivantes :

1° *Dans une même lame, les carrés des diamètres des anneaux de divers ordres suivent la série des nombres* 0, 1, 2, 3, 4, etc.;

2° *Dans les lames d'épaisseur différente, les carrés des diamètres des anneaux du même ordre sont en raison inverse des racines carrées des épaisseurs des lames.*

Quant à l'épaisseur que doit avoir une lame pour produire des anneaux de grandeur déterminée, elle dépend du rapport des vitesses ordinaire et extraordinaire de la lumière dans l'intérieur du cristal.

En soumettant à l'expérience un certain nombre de cristaux de la même substance, M. Herschel en a reconnu certains dans lesquels les anneaux étaient plus ou moins ovales; si l'on venait alors à tourner la plaque dans un plan, on voyait la croix noire se briser, suivant des courbes plus ou moins contournées. Ces effets sont dus à une cristallisation irrégulière; le quartz, le béril, etc., les présentent fréquemment. L'apophyllite et l'hyposulfate de chaux offrent, sous ce rapport, des modifications dans le phénomène des anneaux, dont l'étude jette du jour sur la constitution moléculaire de ces cristaux. On a analysé ainsi les anneaux colorés dans les cristaux à deux axes pour en connaître les lois; l'on doit à M. Herschel des appareils fort commodes pour étudier ces divers phénomènes, et à l'aide desquels il a montré que, dans les cristaux à deux axes, les couleurs étaient distribuées sur des lemniscates, c'est-à-dire, sur des courbes à deux centres, jouissant de propriétés bien définies; et il a reconnu que, dans presque tous les cristaux de cette catégorie, les diverses couleurs simples avaient des axes différents.

Enfin, on observe des franges hyperboliques ou parallèles dans les cristaux quand on présente à un rayon polarisé une lame de cristal de roche dont l'une des faces est parallèle à l'axe, et l'autre peu inclinée; ces bandes, que l'on peut apercevoir à l'œil nu, sont rouges et vertes, toutes les fois que l'on regarde d'un peu loin, et que l'épaisseur du prisme près du sommet est environ le tiers ou moitié d'un millimètre.

XII. POLARISATION CIRCULAIRE.

Lorsqu'un faisceau de lumière homogène polarisée traverse perpendiculairement une plaque de cristal de roche taillée dans un

sens perpendiculaire à l'axe, il reste encore polarisé après son émergence; mais son plan de polarisation est changé. Les plaques de certains cristaux le font tourner de droite à gauche, d'autres de gauche à droite par rapport au plan primitif de polarisation. Ce phénomène, observé dans le cristal de roche par MM. Seebeck et Arago (mais étudié particulièrement par le premier dans un grand nombre de substances), et par M. Biot dans les liquides et les vapeurs, a reçu le nom de *polarisation circulaire.*

En étudiant ce phénomène avec des plaques de diverses épaisseurs tirées d'un même échantillon, et sur des plaques de divers échantillons, on a été conduit aux lois suivantes :

1° Pour toutes les plaques tirées d'un même cristal, la rotation du plan de polarisation est proportionnelle à l'épaisseur.

2° Dans une variété de quartz nommée *plagièdre* par Haüy, le sens des inclinaisons des facettes détermine toujours le sens de rotation du plan de polarisation.

3° Quand un cristal tourne de gauche à droite ou de droite à gauche, la même épaisseur imprime toujours, à très-peu près, la même rotation.

4° En superposant deux plaques qui agissent en sens contraire, l'effet qu'elles produisent est à peu près égal à celui d'une seule plaque ayant une épaisseur égale à leur différence, et agissant comme la plus épaisse.

5° Les diverses couleurs du spectre éprouvent dans leur plan de polarisation des rotations d'autant plus grandes qu'elles sont plus réfrangibles.

Les lois 1, 3 et 5 sont dues à M. Biot.

Pour donner une idée de l'importance de l'étude de la polarisation circulaire dans les recherches relatives à la constitution moléculaire des corps, nous dirons que M. Brewster a reconnu que les couches successives qui composent certains échantillons d'améthyste possèdent des propriétés contraires, et qu'elles font tourner le plan de polarisation dans un sens ou dans un autre. Dès lors, si l'on fait passer un faisceau de lumière polarisée au travers d'une plaque d'améthyste convenablement taillée, on a une série de franges composées et coloriées de mille manières.

Passons au mouvement du plan de polarisation dans les liquides et les gaz.

M. Biot a étudié ce phénomène dans les huiles essentielles et dans divers composés liquides et gazeux, et les résultats qu'il a obtenus sont

de la plus haute importance pour l'étude de la constitution moléculaire des corps, et même leur composition dans quelques cas. L'appareil dont il s'est servi à cet effet se compose d'un tube métallique terminé par deux glaces parallèles, et rempli du liquide sur lequel on veut expérimenter. Quand on altère la pureté d'un liquide par l'addition d'un autre, sans action sur lui, l'effet total est toujours égal à la somme ou à la différence des actions particulières qui seraient produites séparément par les molécules de chaque espèce; cette loi se soutient encore quand les molécules sont soumises à des actions chimiques, et quand même les liquides actifs passent à l'état de vapeur, comme M. Biot l'a constaté en opérant sur de longs tuyaux remplis de vapeur d'essence de térébenthine. Nous reviendrons sur les intéressantes recherches de M. Biot; pour l'instant, nous nous bornerons à dire que les essences de térébenthine et de laurier, la gomme arabique, etc., font tourner le plan de polarisation de droite à gauche; tandis que l'essence de citron, le sirop de sucre, la solution alcoolique, le camphre, la dextrine et l'acide tartrique le font tourner de gauche à droite.

C'est encore Fresnel qui, dans le système des ondulations, a donné la théorie de la polarisation circulaire; mais, craignant de donner trop d'étendue à cette introduction historique, nous regrettons de ne pouvoir faire connaître les vues théoriques sur lesquelles il s'est appuyé.

Couleurs des corps irrégulièrement agrégés.

Les corps irrégulièrement agrégés présentent également des couleurs; nous citerons pour exemple des lames de verre chauffées lentement jusqu'au rouge, et refroidies brusquement. Dans cet état, elles se comportent comme les corps cristallisés, c'est-à-dire, que les faisceaux qui les traversent sont colorés des nuances les plus vives. Cet effet est dû à la trempe, et par suite à l'état forcé dans lequel se trouvent les molécules; car si on enlève de la lame un fragment quelconque, cas où l'on dérange l'arrangement moléculaire, on change en même temps les couleurs. Fresnel a trouvé la cause du phénomène en démontrant que les couleurs produites par la lumière polarisée dans le verre trempé, dépendent de l'inégale élasticité de l'éther dans différents sens, d'où résulte inégalité de vitesse, d'interférence, comme dans les lames cristallisées. Les lames de verre, pendant qu'elles vibrent, donnent également des traces de coloration, comme M. Biot l'a reconnu; MM. Seebeck et Brewster ont observé que des lames de verre pressées dans un étau présentaient des effets analogues, et qu'il

en était de même pour des gelées animales serrées entre deux lames de verre. Des différences de température, entre diverses parties des lames, suffisent pour donner les mêmes apparences. Les cristaux, dans des circonstances semblables, se comportent pareillement. Pour terminer ce que nous avons à dire sur la lumière, il ne nous reste plus qu'à parler de l'absorption de la lumière polarisée.

Absorption de la lumière polarisée.

La tourmaline offre ce phénomène à un degré remarquable; cette substance jouit de la double réfraction, comme on le reconnaît en faisant tourner un prisme de tourmaline, dont l'arête est parallèle à l'axe, et dont l'angle réfringent est très-petit; de plus, elle jouit de la propriété d'absorber les faisceaux polarisés dans la section principale, tandis qu'elle conserve celle de transmettre les faisceaux polarisés perpendiculaires à cette section. Il existe des tourmalines limpides ou légèrement bleuâtres, qui ne peuvent absorber le rayon ordinaire que lorsqu'elles ont une grande épaisseur; tandis que les tourmalines brunes, en lames très-minces, produisent cet effet. Le carbonate de baryte donne deux images à peu près d'égale intensité, tandis que dans d'autres directions, il absorbe presque complétement le faisceau qui le traverse. M. Brewster a fait, sur les cristaux de nitre, une observation intéressante qui l'a conduit à étudier le jeu des couleurs dans les substances douées du dichroïsme, c'est-à-dire, qui laissent voir deux couleurs différentes, selon qu'on les regarde dans un sens ou dans un autre, et a reconnu que ces couleurs dépendent de la position des axes optiques. M. Babinet a mis à profit les phénomènes d'absorption ou d'extinction de certains rayons du spectre, lorsque la lumière vient à traverser certaines substances minérales pour en tirer des caractères distinctifs de ces substances, entre autres, les prismes de rubis, de grenat, de zircon, de béril, de topaze, qui offrent des différences sensibles dans les spectres que l'on produit par le mode d'expérimentation qu'il indique. Il emploie également l'absorption avec polarisation, pour distinguer les corps, et observe à cet égard que toutes les substances qui offrent la réfraction attractive, exercent le maximum d'absorption sur le rayon extraordinaire, et qu'au contraire, toutes celles qui présentent la double réfraction répulsive, exercent ce maximum sur les rayons ordinaires; cette observation lui a permis de distinguer deux groupes de corps et diverses substances qui ont d'ailleurs beaucoup d'analogie entre elles. Il a également étudié le dichroïsme, et a montré que la lu-

mière transmise à travers un corps doué de cette propriété, se compose de deux parties, l'une, qui n'est pas polarisée, et qui passe dans tous les sens; l'autre, polarisée, et qui passe en plus ou moins grande quantité, suivant qu'elle s'éloigne ou s'approche davantage des axes de réfraction. Les teintes observées sont dues au mélange de ces deux lumières. M. Babinet démontre aussi les effets que produisent sur la lumière les structures d'accroissement par lames parallèles, les structures fibreuses, etc. Dans le premier cas, la lumière, en passant par la tranche, produit des bandes colorées analogues à celles des réseaux ; dans le second, il en résulte une couronne. Ces phénomènes peuvent aider à découvrir dans les corps une structure à lames parallèles ou fibreuses, dans des parties où il était impossible de la soupçonner. Enfin, M. Babinet a montré que les effets d'astéries se rattachent à des effets de réseau résultant de la structure intérieure des corps régulièrement cristallisés. Nous croyons avoir rapporté dans ce précis les faits principaux dont se compose aujourd'hui l'optique, et auxquels nous pourrons avoir recours dans la suite.

CHAPITRE VII.

De la Chaleur.

Des diverses opinions sur la cause de la chaleur.

Aristote considérait la chaleur comme une qualité ou un accident qui réunit les choses homogènes, et désunit ou sépare les choses hétérogènes. Les épicuriens et les partisans des corpuscules rejetaient cette opinion, et regardaient la chaleur comme un pouvoir essentiel ou une propriété du feu, ou plutôt comme une substance volatile du feu lui-même, réduite en atomes et émanée des corps ignés. On voit par là combien étaient obscures les idées des anciens sur la cause de la chaleur.

Homberg, Lémery, Sgravesande, et particulièrement Boerhaave, définissaient ainsi le feu : un corps *sui generis*, qui a été créé tel, qui ne peut être altéré en rien, et ne saurait être produit de nouveau par aucun autre corps, ni être changé en aucun autre, et dont les effets sont la chaleur et la lumière. Bacon, Boyle et Newton ne partageaient pas cette opinion ; suivant eux, la chaleur n'était pas une propriété

originairement inhérente aux corps, mais une propriété qui pouvait y être développée mécaniquement. Descartes et ses partisans émirent une opinion semblable : selon eux, la chaleur consistait dans un certain mouvement des diverses parties d'un corps. Nous passerons sous silence les autres vues systématiques qui n'ont aucune importance, pour nous en tenir aux deux opinions qui règnent dans la science : nous voulons parler du système de l'émission et de celui des ondes.

Dans le premier, on suppose que la chaleur est un fluide impondérable répandu dans tous les corps, et pouvant passer d'un corps à l'autre quand elle devient libre. Ce système prévalut jusqu'à la découverte des lois de la chaleur rayonnante, qui conduisirent à des résultats tellement semblables (du moins dans un grand nombre de cas) à ceux obtenus avec la lumière, que généralement l'on admit que la chaleur était due à un mouvement vibratoire des molécules, transmis aux molécules des corps environnants, par l'intermédiaire de l'éther. Les expériences et déductions de Th. Young, Fresnel, de MM. Arago, Melloni et Forbes, ont puissamment contribué à corroborer cette opinion.

Pour étudier méthodiquement les phénomènes de chaleur, on considère cinq parties principales : 1° les sources d'où elle émane ; 2° la transmission qui a lieu de ces sources aux corps en contact avec elles, ou placés à distance, et les lois de cette transmission ; 3° les effets produits par la chaleur sur les corps, suivant les divers degrés de son intensité ; 4° la mesure de ces effets ; 5° l'action de la chaleur sur les gaz et les vapeurs.

Parmi les sources nombreuses de chaleur que nous offrent la nature, la physique et la chimie, on distingue particulièrement le soleil, la chaleur terrestre, la chaleur stellaire, les actions mécaniques, les actions chimiques, les décharges électriques et les actions capillaires.

Nous n'avons pu jusqu'ici rien apprendre sur la cause qui produit la chaleur solaire ; on a émis, il y a quelques années, l'opinion qu'elle pourrait bien être le résultat de courants électriques circulant autour du noyau du soleil, attendu que ce noyau, suivant les observations faites depuis les temps les plus reculés, ne paraît pas avoir changé. Rien ne prouve le contraire, mais rien ne démontre aussi qu'il en soit ainsi ; de sorte que l'on doit se borner à enregistrer en quelque sorte cette hypothèse, pour y revenir, dans le cas où la découverte de faits nouveaux engagerait à la soumettre à un nouvel examen. En attendant, on a cherché à mesurer la quantité de chaleur que le soleil répand sur la terre

dans le cours d'une année. Cette quantité, suivant M. Pouillet, peut être considérée comme égale à celle qui serait nécessaire pour fondre une couche de glace de quatorze mètres d'épaisseur qui la couvrirait partout, et cependant elle n'est que $\frac{1}{2.381.000.000}$ de la chaleur qui rayonne dans toutes les directions.

Des expériences multipliées ont prouvé que la chaleur terrestre augmente, à mesure que l'on pénètre dans la terre, de 1° centig. pour trente à quarante mètres, et que les variations annuelles de température dues aux influences calorifiques de l'atmosphère, vont au contraire en décroissant, jusqu'à une certaine profondeur où elles ne sont plus sensibles. On attribue généralement l'accroissement de température terrestre à une chaleur centrale ou chaleur primitive. M. Poisson n'a pas adopté cette opinion; suivant lui, cette chaleur n'existe qu'à une certaine profondeur, et résulte du réchauffement que la terre a éprouvé en traversant, à une époque très-reculée, des parties de l'espace qui se trouvaient à une température très-élevée. A cette déduction de l'analyse, on peut opposer cet argument, qui repose sur mille faits géologiques, que la terre ayant été, dans l'origine, à l'état igné, a dû conserver jusqu'à notre époque une chaleur centrale, comme, du reste, Fourier l'a démontré.

La chaleur stellaire est celle qu'émettraient tous les astres, si le soleil, la terre et les planètes, c'est-à-dire, notre système solaire, n'existaient pas. La température résultant de cet état calorifique serait, suivant Fourier, inférieure à celle des limites extrêmes de l'atmosphère, et inférieure, par conséquent, à la plus basse température observée à la surface du globe, laquelle est de — 60°. Poisson n'a porté la température de l'espace qu'au-dessous de 13°, et celle de l'atmosphère à sa limite, à un degré beaucoup plus bas. Si cela était, on ne voit pas comment un milieu, qui se trouverait entre deux autres possédant une températurc supérieure à la sienne, pourrait conserver constamment son état calorifique.

Les actions mécaniques, et en général tout ce qui ébranle les molécules, telles que le frottement, la pression, la percussion, etc., sont autant de causes de dégagement de chaleur. Ce fait est tellement notoire, que nous nous bornerons à le mentionner.

Les actions chimiques produisent également des effets calorifiques. Dans les combinaisons, il y a dégagement de chaleur; dans les dissolutions, abaissement de température; mais les effets produits dépendent encore de différentes causes, parmi lesquelles nous citerons la différence de capacité calorifique du composé qui se forme et de ses

éléments. Le dégagement de la chaleur dans la combustion, et en général dans les actions chimiques, a particulièrement attiré l'attention des chimistes et des physiciens, qui en ont fait une des bases de la chimie moderne; la chaleur a été envisagée sous le même point de vue par ceux qui se sont occupés de la théorie électro-chimique.

Les décharges électriques produisent de la chaleur, toutes les fois que l'électricité éprouve des difficultés à circuler dans les corps.

Enfin les actions capillaires dégagent de la chaleur, comme toutes les actions moléculaires. Ce dégagement produit quelquefois une élévation de 1 à 2°; mais il n'est ordinairement que de quelques fractions de degré.

De la transmission de la chaleur par voie de rayonnement et par voie de contact.

La propagation de la chaleur par voie de rayonnement et par contact ou transmission directe a été l'objet de nombreuses recherches qui ont conduit leurs auteurs à la découverte de lois importantes. Ainsi que la lumière, le rayonnement de la chaleur est soumis aux lois de la réflexion, de la réfraction et de la polarisation.

Pour observer les effets du rayonnement, on emploie des appareils appelés *thermoscopes*, dont il sera question ci-après, ou bien des piles thermo-électriques en relation avec un multiplicateur.

On observe la réflexion de la chaleur au moyen de deux miroirs sphériques tellement disposés, qu'en plaçant au foyer de l'un d'eux un corps chaud, et au foyer de l'autre un thermomètre, ce dernier accuse les effets du rayonnement, lesquels sont les mêmes dans le vide comme dans l'air. Quant à la vitesse de la chaleur rayonnante, on sait qu'elle est très-grande; mais jusqu'ici elle n'a pas été déterminée; quant à son intensité, elle varie, comme celle de la lumière, en raison inverse du carré de la distance. On démontre cette loi au moyen du thermoscope ou thermomètre différentiel.

La chaleur émanée par radiation des corps terrestres obscurément chauds, diffère totalement de la chaleur solaire relativement à l'action qu'elle exerce sur les substances transparentes : Mariotte est le premier qui ait signalé cette différence. En l'étudiant, Schèele trouva que la chaleur des corps terrestres est interceptée par les verres et les autres corps transparents dont elle élève la température, tandis que la chaleur solaire traverse ces mêmes corps, sans en modifier la température. Dans le premier cas, elle devient chaleur sensible; dans le second, elle reste chaleur rayonnante.

De la Roche, qui a traité ensuite cette question avec beaucoup de sagacité, a démontré que l'absorption de chaleur terrestre n'était complète que lorsque la source de chaleur était à une basse température; que si celle-ci était élevée, la chaleur rayonnante acquérait la faculté de traverser le verre, et cela avec d'autant plus de facilité que la température était plus haute. On dut conclure de là que la chaleur terrestre et la chaleur solaire ne différaient entre elles que sous le rapport de l'intensité. Il découvrit ensuite que la chaleur rayonnante, en traversant une lame diaphane, y subit une certaine modification qui la rend plus ou moins apte à être transmise par telle ou telle autre substance transparente. Les effets si variés du rayonnement n'ont pu être expliqués que lorsque Prévost, de Genève, eut fait paraître une théorie qui répond aux exigences de la science. Cette théorie repose sur le principe suivant : Tous les corps rayonnent sans cesse de la chaleur dans tous les sens, et absorbent également celle émise par d'autres corps, jusqu'à ce qu'il y ait égalité de température entre eux : par un échange mutuel, celui qui en a le plus en cède à celui qui en a le moins. En s'appuyant sur ce principe, on a expliqué la rosée et d'autres phénomènes météorologiques qui jusque-là n'avaient pu l'être.

La chaleur qui traverse certains corps solides ou liquides, a été l'objet de recherches intéressantes de la part de M. Melloni, qui, à l'aide de la pile thermo-électrique et du multiplicateur, trouva que la chaleur rayonnante provenant de la flamme d'une lampe dite de *Locatelli*, se transmettait instantanément à travers les milieux transparents; qu'en interposant sur son passage des plaques d'alun, de sel gemme ou de cristal de roche d'une épaisseur commune de trois à quatre millimètres, ces plaques ne transmettaient pas la même quantité de chaleur rayonnante. En substituant à l'alun un morceau de cristal de roche enfumé, d'une épaisseur beaucoup plus grande, M. Melloni reconnut que ce dernier, plus épais et moins transparent que l'autre, transmettait la plus grande quantité de rayons calorifiques, et que la transparence des corps, pour la chaleur rayonnante, était différente de la transparence proprement dite.

En substituant à la flamme d'une lampe le platine incandescent, et soumettant à l'expérience une plaque d'alun, de sel gemme et une autre de cristal de roche, M. Melloni reconnut que l'alun ne laissait passer aucun des rayons calorifiques émis; que le cristal de roche n'en transmettait qu'une certaine quantité, et le sel gemme une quantité double. Voilà donc une substance parfaitement transparente, l'alun,

qui ne laisse point passer de la chaleur rayonnante d'un fil de platine incandescent. M. Melloni a appelé *diathermanes*, les corps qui laissent passer la chaleur rayonnante ; et *athermanes*, les corps privés de cette faculté, comme l'alun en est un exemple. En variant le poli, l'épaisseur et la nature des plaques, il a été conduit aux résultats généraux suivants :

1° Plus le poli est parfait, plus, toutes choses égales d'ailleurs, la quantité de chaleur qui traverse les plaques est considérable.

2° La quantité de chaleur qui traverse les plaques de même épaisseur et de nature différente, est très-variable, puisque le cristal de roche enfumé en laisse passer plus que le cristal incolore ; que le sel gemme est le corps qui en laisse passer le plus, et l'alun, le moins.

3° La quantité de chaleur qui traverse une plaque, diminue à mesure que son épaisseur augmente, à l'exception toutefois du sel gemme.

4° Lorsque deux lames sont superposées, l'effet est moindre que celui produit dans une seule lame d'une épaisseur égale à celle résultant de la superposition.

5° Dans la superposition de plusieurs lames de même nature ou de nature différente, l'effet produit est indépendant de l'ordre de superposition.

6° Quand on fait tomber sur une même plaque un faisceau d'égale intensité, mais provenant de sources différentes, les quantités de chaleur transmises sont d'autant plus petites que la température propre de chaque source est moindre; la différence est d'autant plus petite que les lames sont plus minces.

7° La chaleur rayonnante qui a traversé une substance diathermane est plus ou moins susceptible d'être transmise par d'autres substances.

8° Lorsque la chaleur rayonnante traverse une semblable lame, elle subit à ses deux surfaces des réflexions qui lui font perdre les 0,077 de son intensité primitive.

9° Enfin, la quantité de la chaleur transmise résulte de la somme totale des rayons qui émergent après avoir éprouvé deux, quatre, six, etc., réflexions; mais les rayons qui sortent après quatre, six réflexions, ont une intensité si faible qu'on peut les négliger, bien que leur nombre soit pour ainsi dire infini.

Les expériences de M. Melloni tendent encore à démontrer que la chaleur rayonnante émanée d'une source de chaleur, est formée de diverses espèces de rayons, en proportions variables, de même que la

lumière est composée de rayons colorés, et qu'il existe des substances qui laissent passer certains rayons, et d'autres qui les arrêtent.

La chaleur se réfléchissant comme la lumière, on a dû rechercher si le pouvoir réfléchissant variait avec l'état de la surface et la nature du corps; l'expérience a prouvé, 1° que ce pouvoir est d'autant plus grand que la surface est mieux polie; 2° que la nature du corps exerce une grande influence sur ce pouvoir. Il résulte des expériences de Leslie, de Melloni et de Rumfort, qu'en général le pouvoir réflecteur est beaucoup plus considérable dans les métaux que dans les autres corps, tandis qu'il est nul dans le noir de fumée, et très-faible dans le verre huilé. Ils ont encore reconnu que l'intensité du rayon réfléchi varie avec l'inclinaison; qu'elle est à son minimum sous l'incidence normale, et augmente à mesure que le rayon incident se rapproche de la surface, et qu'enfin le pouvoir réflecteur varie avec la source de chaleur pour tous les corps, à l'exception des métaux.

Outre le pouvoir réflecteur, on a encore étudié le pouvoir émissif et le pouvoir absorbant. Le pouvoir émissif est cette faculté que possède un corps chauffé d'émettre de la chaleur par voie de rayonnement; ce pouvoir varie avec l'inclinaison du rayon sur la surface; et, pour la même inclinaison, il n'est pas le même pour chaque corps. Le pouvoir absorbant est la propriété que possède un corps d'absorber de la chaleur qui lui est transmise par voie de rayonnement.

Fourier a démontré que l'intensité de la chaleur émise par une surface est proportionnelle au sinus de l'angle formé par la direction de ce rayon avec le plan. Leslie et M. Melloni ont également déterminé le pouvoir émissif des corps, qui est l'inverse du pouvoir réflecteur; les métaux ont le pouvoir le plus faible, et le noir de fumée le plus fort.

Le pouvoir absorbant varie comme le pouvoir émissif, et tous deux sont égaux dans le cas d'équilibre de température ou pour une même différence entre les températures du corps et celle du milieu ambiant. Ce pouvoir a été déterminé par Leslie et M. Melloni pour quelques substances. M. Melloni a reconnu, en outre, que les pouvoirs absorbants varient avec les sources de chaleur.

La chaleur, outre la propriété d'être réfléchie, émise et absorbée par un corps, possède encore, comme la lumière, celle d'être polarisée, faits qui concourent à établir son identité avec elle. La polarisation de la chaleur a d'abord été annoncée en 1810 par M. Bérard, puis mise en doute successivement par MM. Powell, Melloni et Nobili; reconnue de nouveau en 1834 par M. Forbes, à l'aide de plaques de tourmaline ou de piles de mica. La plus grande quantité de chaleur

polarisée qu'il obtint avec un système de piles de mica, fut les 0,4 de la chaleur émanée d'une spirale incandescente de platine. M. Melloni, ayant repris de nouveau cette question, reconnut également la polarisation de la chaleur, et en étudia toutes les propriétés avec le plus grand soin. Il fit usage des mêmes appareils dont il s'était servi pour le rayonnement de la chaleur, et, en outre, d'un système de deux tourmalines. Il résulte de ses expériences, qu'avec une flamme d'une lampe sans verre, l'absorption varie, avec la nature des tourmalines, de 0,0371 à 0,22. Les tourmalines vert foncé et jaune fauve donnent les limites extrêmes.

Toutes les questions mathématiques relatives à la transmission de la chaleur dans les corps placés sous l'influence de causes extérieures d'échauffement et de refroidissement, ont été résolues par Fourier, puis développées et complétées par Laplace et Poisson. Au moyen de l'analyse mathématique, on a pu établir les conditions dont dépend le maintien de la température actuelle de la surface de la terre, ainsi que l'influence que peut avoir la chaleur centrale sur nos climats, et la somme de chaleur que nous recevons du soleil dans chaque saison.

Passons à la transmission de la chaleur par contact, et, par suite, à sa propagation dans les corps. Quand un corps solide chaud est en contact avec un autre à une température inférieure à la sienne, le premier cède au second une portion de sa chaleur, qui se propage de molécule à molécule par voie de rayonnement, en diminuant d'intensité, et d'autant plus rapidement que le corps qui s'échauffe est meilleur conducteur. On conçoit qu'à un certain instant la température de chaque point devienne constante, quoique différente d'un point à un autre; cet état d'équilibre a lieu quand chaque tranche idéale cède autant de chaleur à la tranche qui la suit qu'elle en prend à la tranche qui la précède. La loi de la propagation est celle qui indique comment la chaleur varie d'une tranche à l'autre. Si l'on considère une barre métallique suffisamment mince pour que l'on puisse regarder tous les points d'une même tranche comme possédant la même température, et que sa longueur soit suffisante pour que le foyer de chaleur dans lequel se trouve une des extrémités n'influence en rien l'autre extrémité par rayonnement direct, on démontre que pour des points distants, et tels que la distance à la source soit en progression arithmétique, les excès de température des points décroissent en progression géométrique. La raison de cette progression se déduit facilement de la conductibilité de la barre dont elle dépend. C'est par cette mé-

thode que M. Despretz a déterminé le pouvoir conducteur d'un certain nombre de corps. Les métaux sont en première ligne, puis le marbre, la porcelaine, etc., et enfin les substances composées de filaments très-fins, telles que le coton, la laine, la paille, etc. Quant au bois, MM. de la Rive et Marcet ont reconnu que la conductibilité dans le sens perpendiculaire aux fibres est moindre que dans le sens de ces fibres, et que l'on peut ainsi ranger les bois relativement à leur pouvoir conducteur, noyer, chêne, sapin, peuplier, liége.

Les liquides sont, en général, peu conducteurs de la chaleur; on avait pensé qu'elle s'y propageait, non par voie de rayonnement, de molécule à molécule, comme dans les solides, mais bien par le déplacement de couches successives qui, étant inégalement échauffées, et n'ayant pas par conséquent la même densité, se mêlaient continuellement. Ayant reconnu depuis qu'en plaçant un corps chaud à la surface d'un liquide, au fond duquel se trouvait un thermomètre, celui-ci était influencé, on dut en conclure qu'il y avait eu transmission de chaleur, puisqu'il n'avait pas dû y avoir de déplacement de liquide. Il aurait pu se faire cependant que l'effet fût dû à la transmission de la chaleur rayonnante émanant de la source. Quoi qu'il en soit, cette communication de la chaleur du haut en bas est très-faible : d'autres expériences tendent aussi à faire admettre la propagation moléculaire. La question en était là, lorsque M. Despretz la reprit, en 1839, et constata par l'expérience les faits suivants : 1° un cylindre liquide, d'un mètre de hauteur et de $0^{m}218$ de diamètre, chauffé à sa partie supérieure par une source constante de chaleur pendant un temps suffisamment long, présente un état thermométrique constant ; 2° les températures des points équidistants de l'axe, diminués de la température de l'air environnant, donnent une progression géométrique décroissante, comme cela aurait lieu dans une barre solide suffisamment longue ; 3° deux cylindres différents par leur diamètre conduisent au résultat suivant : les logarithmes des quotients des deux progressions géométriques sont en raison inverse des racines carrées des diamètres. Aussitôt que ces résultats furent publiés, on objecta à M. Despretz que les effets étaient dus à l'action des parois ; il fit alors de nouvelles expériences, et montra que les parois étaient plus froides que le liquide, et de plus, que la température allant en décroissant du centre à la circonférence, la chaleur s'échappait du liquide à travers les parois, et ne passait pas des parois au liquide.

La chaleur rayonnante traverse les gaz, de même que les liquides, par le déplacement des parties qui, en s'échauffant, s'élèvent dans

la partie supérieure, et se mêlent avec celles qu'elles rencontrent. Ces déplacements sont d'autant plus rapides, que les gaz ont moins de densité; quant au rayonnement moléculaire, il est extrêmement faible.

Des lois du réchauffement et du refroidissement des corps.

Lorsqu'un corps chaud est placé dans un milieu quelconque, ayant une température inférieure à la sienne, il se refroidit en plus ou moins de temps, suivant diverses circonstances que nous allons indiquer. Supposons-le d'abord dans le vide, le refroidissement provient uniquement du rayonnement; s'il se trouve dans l'air, ou dans un gaz, il se refroidit, non-seulement comme dans le vide, mais encore en raison de son contact avec les gaz environnants qui lui enlèvent successivement la chaleur.

Les lois du refroidissement des corps ont été l'objet des recherches d'un grand nombre de physiciens : Newton est le premier qui s'en soit occupé. Il avait posé en principe qu'à chaque instant la quantité de chaleur perdue par un corps était proportionnelle à l'excès de la température de ce corps sur celle du milieu ambiant; mais cette loi ne se vérifie que pour des différences de température qui ne s'élèvent pas au delà de 20 à 30°. Richmann, en ayant montré l'inexactitude, lui en substitua une autre, d'après laquelle la température décroissait plus rapidement que dans la loi de Newton.

Dalton fit des expériences qui tendaient à vérifier la loi de Richmann; de la Roche posa en principe que la perte de chaleur suivait une progression plus rapide que l'excès de température du corps sur celle du milieu ambiant; enfin, en 1817, Petit et Dulong publièrent un travail complet sur les lois du refroidissement des liquides dans le vide et dans les gaz; ces lois ont conduit aux conséquences suivantes : La nature de la surface est sans influence sur les pertes de chaleur dues au contact seul des gaz. Pour un même gaz, sous la même pression, mais à des températures différentes, les pertes de chaleur sont les mêmes pour les mêmes différences de température.

Quand l'élasticité du gaz varie en progression géométrique, la vitesse du refroidissement varie aussi en progression géométrique; lorsque le rapport de la progression est 2, le deuxième est 1,366 pour l'air, 1,301 pour l'hydrogène, 1,431 pour l'acide carbonique, 1,415 pour le gaz oléfiant.

Ces lois ne s'appliquent qu'aux corps solides de petite dimension; il n'en est pas de même dans les liquides, attendu que la température peut être considérée comme étant la même dans tous les points à chaque

instant, en raison des mouvements inférieurs résultant du mélange des parties qui n'ont pas la même température, ce qui ne saurait avoir lieu avec les corps solides ayant de grandes dimensions. Dans ce cas, la variation de température dépend de diverses causes, entre autres de la conductibilité de la matière.

De la dilatation des corps : des thermomètres.

Toutes les fois qu'un corps reçoit ou perd de la chaleur, son volume augmente ou diminue; quelques corps cependant font exception quand ils changent d'état; tels sont l'eau, la fonte, le fer et le bismuth.

La dilatation des corps solides, dont les effets intéressent si vivement les arts, a été étudiée avec soin par Laplace, Lavoisier, Ramsden, Roy, Dulong et Petit. Les deux premiers avaient avancé que les corps se dilataient d'une manière uniforme de 0° à 100°. Petit et Dulong, qui ont mis plus de précision dans leurs expériences, ont trouvé que pour un même degré la dilatation croissait avec la température; mais que de 0° à 100°, cet accroissement était insensible, et qu'il devenait considérable de 0° à 300°. On considère trois espèces de dilatation : la dilatation linéaire, la dilatation des surfaces et celle du volume. La dilatation des surfaces est double de la première, et la dilatation des solides sensiblement triple.

Les liquides se dilatent et se contractent, comme les solides, par l'effet de la chaleur; c'est sur cette propriété que sont fondés les thermomètres, appareils destinés à comparer les diverses quantités de chaleur sensible que possèdent les corps.

Galilée paraît être le premier qui ait eu l'idée de cet instrument; on trouve à ce sujet le passage suivant dans l'*Histoire des Sciences mathématiques en Italie*, par M. de Libri :

« Le thermomètre de Galilée se composait d'un tube de verre de « petit diamètre, ouvert à une de ses extrémités, et terminé à l'autre « par une boule. Après y avoir introduit un peu d'eau, on plaçait « l'extrémité du tube dans une position verticale; la pression de l'air « retenait le liquide dans le tube, et le thermomètre était construit. »

Quand on approchait un corps chaud de la boule de l'instrument, l'air se dilatait et échauffait le liquide placé dans la partie supérieure, qui descendait alors dans le tube, et remontait par le refroidissement. Cet appareil, qui n'était réellement qu'un thermoscope, fut construit par Galilée, en 1597 (*Galilei Op.*, tom. I, p. LXVII; *Nelli, vita*, t. I, p. 72). Ce grand physicien fit connaître ces effets au P. Castelli, en 1603 (*Nelli, vita*, t. I. p. 69). Sagredo, ami de Galilée, fit, en 1613, à Ve-

nise, des observations météorologiques avec cet instrument. Quoi qu'il en soit, on a attribué la découverte du thermomètre à Bacon, à Fludd, à Drebbel, à Sanctorius, à Sarpi. Mais si l'on discute les dates auxquelles se rapporte la découverte faite par chacun des prétendants, on trouve qu'elles sont toutes postérieures à 1597. Passons aux perfectionnements que cet instrument a reçus successivement.

Drebbel se servit, dit-on, de la dilatation de l'air pour mesurer les variations de température; les académiciens de Florence substituèrent l'alcool à l'air, afin que les indications de l'instrument ne fussent plus influencées par la pression atmosphérique, et lui donnèrent la forme que nous lui connaissons. Bayle plaça le réservoir dans la partie inférieure, afin de pouvoir plonger l'instrument dans un liquide. Il prit pour terme fixe de température la liquéfaction de l'huile d'anis; Halley et Amontons la température de l'eau bouillante; Newton substitua l'huile de lin à l'alcool, et prit pour points fixes la glace fondante et l'ébullition de l'eau. Roemer substitua le mercure à l'alcool, et adopta l'échelle connue sous le nom de *Fahrenheit*. Il choisit pour le zéro le froid le plus intense de l'Islande, et prit les mêmes points fixes que Newton. Ce thermomètre était divisé en deux cent douze parties; le terme de la glace fondante correspondait au 32° de cette division. Réaumur divisa l'intervalle entre les deux points fixes en quatre-vingts parties; et, depuis l'adoption du système décimal, on a fixé la division en cent parties. Fahrenheit découvrit que le terme de l'ébullition de l'eau variait suivant la pression de l'air.

En comparant la marche du thermomètre à mercure à celle du thermomètre à air, Petit et Dulong ont obtenu les résultats suivants :

Thermomètre à mercure ordinaire.	Thermomètre à air corigé de la dilatation du verre.	Différence.
100°	100°	0
150°	148,70	1,30
200°	197,05	2,95
250°	245,05	4,95
300°	292,70	7,30
360° Ébullition du mercure.	350	10,00

Des expériences toutes récentes entreprises par M. Regnault lui ont donné des résultats bien différents. En effet, suivant ce physicien, le thermomètre à mercure et le thermomètre à air s'accordent à peu près exactement entre zéro et 100°, comme M. Gay-Lussac l'avait trouvé. Les deux thermomètres marchent encore sensiblement d'accord

depuis 100° jusqu'à 250°; ce n'est qu'à partir de ce point que le thermomètre à mercure prend l'avance sur l'autre. A 300°, la différence est de 1° environ; à 325° de 1°,75; à 350° de 3°. Comment supposer que Petit et Dulong, qui étaient si exacts, si précis dans leurs expériences n'aient point tenu compte des causes d'erreur qui ont amené des différences aussi notables que celles qui existent entre leurs résultats et ceux que nous venons de rapporter ?

M. Regnault a constaté des faits importants que nous ne pouvons nous dispenser d'indiquer. Deux thermomètres à mercure qui s'accordent pour le zéro et la température de l'ébullition ne s'accordent pas pour tous les autres points de l'échelle, comme on le croyait. Les différences vont quelquefois à plusieurs degrés, quand les deux thermomètres n'ont pas été construits avec la même espèce de verre. Il résulte de là que les thermomètres à mercure, destinés à des expériences précises et comparables, doivent être comparés, non-seulement pour les points fixes de l'échelle, mais encore à des températures élevées.

Passons à d'autres thermomètres.

Tous les corps ne suivant pas la même loi de dilatation, il s'ensuit que des thermomètres construits avec des substances différentes ne doivent pas accuser la même température quand ils sont placés dans les mêmes circonstances calorifiques, comme du reste le prouve le tableau suivant :

Températures indiquées dans les mêmes circonstances par différents thermomètres, un degré étant un centième de la dilatation totale de la glace fondante à l'ébullition.

Thermomètre à air	300°
— de verre	352,9
— de fer	372,6
— de cuivre	329
— de platine	311,6
— à mercure corrigé de la dilatation du verre	314,15
— à mercure ordinaire	307,8

Quant au thermomètre à alcool, sa marche est différente de celui à mercure, attendu que la dilatation de ce dernier métal ne suit pas la même loi que celle de l'alcool. On emploie ordinairement cet appareil à évaluer des températures très-basses, que le thermomètre à mercure ne peut accuser quand on arrive au point de la congélation du mercure.

Les thermomètres à air ne servent que dans les expériences de précision, lorsqu'il s'agit de mesurer des températures très-hautes et très-basses, surtout vers —40° et au-dessous, attendu que le thermomètre à mercure ne peut être employé pour des températures voisines du terme de la congélation du mercure, et qu'en outre, on ne connaît pas la loi de dilatation de l'alcool après ce terme.

Nous nous abstenons de mentionner ici tout ce qui concerne la construction des thermomètres, comme ne pouvant trouver place dans cette introduction, qui ne doit renfermer que les lois générales et les faits principaux qui ont servi à établir ces instruments.

Le zéro de l'échelle du thermomètre, qui indique le degré de la glace fondante, n'est pas fixe. M. Flaugergue a trouvé, en 1823, qu'il se déplaçait avec le temps, et s'élevait d'une fraction de degré. M. Bellani, qui a étudié la marche de ce phénomène, reconnut que le déplacement allait toujours en augmentant pendant deux ans environ, et qu'il cessait ensuite. On ne peut attribuer cet effet qu'à la lenteur des molécules du tube de verre qui a été chauffé, à reprendre leur position d'équilibre. M. Legrand, en étudiant de nouveau ce phénomène, a été conduit à plusieurs faits intéressants que nous ne pouvons mentionner ici, mais desquels il résulte que le déplacement du zéro n'a pas lieu aux températures ordinaires avec le cristal, qu'il se produit également quand le thermomètre est ouvert, et qu'il doit être attribué au retrait du verre quand le refroidissement du tube a été subit. D'après cela, il faudrait faire les réservoirs en cristal; et toutes les fois que l'on observe à des températures élevées, avoir l'attention, à chaque opération, de vérifier le zéro de l'échelle. M. Despretz ayant étudié également cette question avec soin a trouvé que le zéro du thermomètre éprouve des oscillations dans le cours même des expériences. Si cet instrument est tenu à une température basse, comme — 20 degrés, pendant un certain temps, le zéro monte; si, au contraire, l'instrument est tenu à une température élevée, le zéro baisse. Dans l'un et dans l'autre cas, le zéro ne revient pas immédiatement au point primitif, quoique le thermomètre soit plongé dans de la glace à zéro. M. Despretz a tiré de ce dernier fait et d'autres semblables, cette conséquence que toutes les fois que les molécules d'un corps solide ont été déplacées par une force quelconque, elles ne reprennent pas immédiatement leur position, quand cette force a cessé son action.

Outre les thermomètres dont on vient de parler, on fait encore usage de thermoscopes, de thermomètres différentiels, qui servent à

indiquer des faibles variations de température. Le thermoscope de Rumfort se compose d'un tube capillaire, dont les deux extrémités recourbées verticalement sont terminées par deux boules fermées de même dimension, et remplies d'air; une petite colonne de mercure est introduite dans le tube horizontal; l'appareil est disposé pour que cette colonne de mercure, qui sert d'index, soit au milieu; quand les deux boules ont la même température, dès l'instant qu'une des boules reçoit plus de chaleur que l'autre, l'air qu'elle renferme se dilate, et l'index est chassé vers l'autre boule. On gradue les thermoscopes, en prenant pour point de départ le point où se trouve l'index quand les deux boules ont la même température, et on plonge une des boules dans de l'eau dont la température et celle de l'air sont connues; on note les points où l'index s'arrête, et l'on divise l'intervalle entre les deux points en parties égales; chaque division exprime une fonction de la différence entre la température de l'eau et celle de l'air.

Leslie qui, en même temps que Rumfort, imagina aussi un thermoscope auquel il donna le nom de *thermomètre différentiel*, recouvrit une des boules d'une couche d'or ou d'argent, afin que les rayons de chaleur qui pourraient arriver dessus fussent réfléchis. Cet appareil peut servir à obtenir des mesures exactes.

Les thermomètres métalliques sont peu employés; leur forme est très-variée; le principe général repose sur l'allongement d'une lame de métal fixée par une de ses extrémités contre un corps dont la dilatation est beaucoup plus petite que la sienne, et dont l'autre extrémité repose sur un système de lames qui font mouvoir, à mesure que la lame se charge, l'aiguille d'un cadran dont les divisions sont exprimées en fonctions des degrés d'un thermomètre ordinaire. On doit à M. Bréguet un thermomètre métallique d'une grande sensibilité; il se compose de trois lames métalliques, d'inégale dilatabilité (or, argent, platine), réunies entre elles d'une manière invariable, et formant une hélice cylindrique; les lames sont disposées de telle manière que celle qui se dilate le moins se trouve dans la concavité de la courbure. L'une des extrémités de cette hélice est fixe, et l'autre est munie d'une aiguille qui indique, par ses mouvements, de combien le système s'est tordu ou détordu par suite des changements de température et de l'inégalité de dilatation du platine et de l'argent. Ces lames sont réunies par une forte pression ; néanmoins M. Bréguet aurait pu supprimer la lame d'or. L'expérience prouve que les arcs décrits par l'aiguille sont proportionnels aux variations de température ; rien n'est plus simple que de comparer la marche de ce thermo-

mètre avec celle du thermomètre ordinaire. Borda employa, dans la mesure d'un arc du méridien de la France, un thermomètre métallique très-simple, et dont on peut voir la description dans le *Traité de physique* de M. Péclet, t. I, page 541.

Pour évaluer dans les arts la température des fourneaux, on se sert de pyromètres, qui sont métalliques ou non métalliques. Le pyromètre métallique le plus simple se compose d'une masse de terre cuite, sillonnée d'une rainure dans laquelle s'engage une barre métallique, fixée par une de ses extrémités, et dont l'autre s'appuie sur un petit levier mobile autour d'un point fixe, et dont le bout parcourt un cadran divisé aussitôt que la lame dont le bout est plongé dans le foyer de chaleur se dilate; et comme la masse d'argile se dilate beaucoup moins que le métal, les effets obtenus sont dus presque entièrement à la dilatation du métal.

Parmi les pyromètres non métalliques, nous citerons celui de Wegwood, qui est le plus généralement employé. Son usage repose sur la propriété que possède l'argile d'éprouver un retrait après avoir été chauffée, retrait d'autant plus grand que la température a été plus élevée; mais on ignore la loi de ce retrait. Ce pyromètre se compose d'une plaque de cuivre sur laquelle sont fixées trois barres du même métal, inclinées entre elles, de telle manière que l'intervalle de deux de ces lames soit égal à celui que formerait le prolongement de l'une d'elles et de la troisième; l'une de ces barres porte une échelle divisée en 240°. Ces intervalles sont destinés à recevoir de petits cônes tronqués en argile cuite à la chaleur rouge, et aboutissant au zéro de la division. Quand on veut opérer, on introduit plusieurs de ces petits cônes dans le foyer de chaleur, et on juge du retrait en les introduisant dans les intervalles. Tous les cônes doivent être fabriqués avec une argile homogène. Par ce moyen, on ne peut obtenir que des approximations, car on ignore si le retrait est proportionnel à la température. Le zéro du pyromètre correspond à 580°,55 du thermomètre centigrade.

Il existe encore d'autres thermomètres qui sont employés dans différents cas; nous voulons parler des thermomètres à maxima et à minima; leur usage exigerait que nous entrassions dans des détails de construction que nous ne pouvons donner ici. Nous renvoyons pour cela aux Traités de physique. Nous nous bornerons seulement à dire que ces thermomètres servent à faire connaître le maximum ou le minimum de chaleur dans les variations de température qui ont lieu pendant un certain temps.

Passous à la dilatation des gaz. MM. Gay-Lussac et Dalton avaient avancé presque en même temps, et sans pourtant se communiquer leurs travaux, que tous les gaz se dilataient également à la même température de 0° à 100°. Suivant le premier, la dilatation correspondante à 1° du thermomètre centigrade était de $\frac{1}{267}$ de leur volume à zéro; le même résultat fut obtenu par Petit et Dulong: ce coefficient de dilatation fut considéré comme inexact par M. Rudberg qui trouva 0,00365, au lieu de 0,00375. MM. Magnus et Regnault reprirent cette question, mais en évitant les causes d'erreurs négligées par plusieurs de leurs prédécesseurs, et obtinrent 0,003665. Au moyen de cette nouvelle détermination, l'ancien coefficient de dilatation de l'air se trouverait trop fort de $\frac{1}{37}$. M. Regnault pensant que l'on ne pouvait plus regarder comme démontré que tous les gaz eussent le même coefficient de dilatation, fit en conséquence de nouvelles expériences pour trouver le coefficient de dilatation de l'azote, de l'hydrogène, de l'oxyde de carbone, des acides carbonique et sulfureux, du cyanogène, du protoxyde d'azote, de l'acide chlorhydrique et de l'ammoniaque; il reconnut que l'azote, l'hydrogène, l'oxyde de carbone avaient sensiblement le même coefficient de dilatation que l'air, dans les circonstances où les expériences avaient été faites, c'est-à-dire, les gaz se trouvant sous la pression atmosphérique quand ils étaient à la température de l'eau bouillante, et sous une pression de 550mm quand ils étaient à la température de la glace fondante; que, dans les mêmes circonstances, l'acide carbonique, le protoxyde d'azote, le cyanogène présentaient, au contraire, un coefficient de dilatation plus fort; le premier étant égal à 0,003689, le deuxième à 0,003676, le troisième à 0,00368; que le coefficient du gaz acide sulfureux était plus fort que ceux obtenus pour les premiers gaz. Les expériences de M. Regnault tendent donc à établir que les gaz, dans les mêmes circonstances, n'ont pas le même coefficient de dilatation; ce coefficient variant de 0,003665 à 0,003685 dans les circonstances susmentionnées.

Les expériences ayant été faites entre les points fixes du thermomètre et sous des pressions peu différentes de celle de l'atmosphère, M. Regnault les a recommencées sous des pressions très-différentes, d'abord plus faibles que celle ordinaire de l'atmosphère, ensuite sous une pression beaucoup plus forte; voici les conséquences auxquelles il a été conduit: La loi admise par les physiciens, savoir, que l'air se dilate de la même fraction de son volume à 0°, quelle que soit d'ailleurs sa densité, n'est pas exacte. L'air se dilate entre

les mêmes limites de température, de quantités qui sont d'autant plus considérables que la densité est plus grande.

Ces expériences ne confirment pas les lois fondamentales admises par tous les physiciens, savoir :

1° Tous les gaz se dilatent de la même quantité entre les mêmes limites de température.

2° La dilatation d'un même gaz entre les mêmes limites de temps est indépendante de la densité primitive du gaz.

M. Regnault ne pense pas néanmoins que ces lois doivent être bannies de la physique; suivant lui, elles sont vraies à la limite, c'est-à-dire, lorsqu'on prend les gaz dans leur plus grand état de dilatation, et quand leur état gazeux est parfait.

Capacités calorifiques, ou chaleurs spécifiques.

Deux corps quelconques n'exigent pas la même quantité de chaleur pour être élevés à la même température; le rapport des quantités de chaleur employées dans cette circonstance, a occupé et occupe encore les physiciens. Blake observa le premier que lorsque la chaleur liquéfie un solide, ou qu'elle gazéifie un liquide, le liquide ou la vapeur n'étaient pas plus chauds que le liquide ou le solide qui les avait produits, quoiqu'il y ait eu une grande quantité de chaleur employée à produire un effet semblable. Il en conclut que la chaleur dépensée devenait chaleur latente, et servait à maintenir le nouvel état; il prouva effectivement que cette chaleur redevenait libre, quand la vapeur se condensait ou que le liquide se solidifiait. Peu de temps après on s'occupa des chaleurs spécifiques des corps, c'est-à-dire, des quantités de chaleur nécessaires pour élever leur température d'un même nombre de degrés; c'est cette propriété qui a fait dire à quelques philosophes, conformément aux idées de Newton, que la chaleur, ainsi que la lumière, était une substance matérielle. Parmi les physiciens qui se sont occupés de cette question, on doit citer Wilke, Crawford, Gadolin, Meyer, Dalton, Lavoisier et Laplace, Dulong et Petit, de la Roche et Bérard, Neumann, Avogadro, Marcet, de la Rive, et enfin M. Regnault.

Trois méthodes ont été employées pour trouver la chaleur spécifique des corps : la méthode des mélanges, celle de la fusion de la glace ou du calorimètre, et enfin celle du refroidissement, qui est due à Meyer. Les premières expériences qui aient été faites avec le plus de précision, sont dues à Petit et Dulong, qui se servirent du refroidissement; Lavoisier et Laplace, par la méthode

de la fusion de la glace, obtinrent des résultats qui s'éloignaient peu de la vérité. A l'aide de la méthode des mélanges entre des limites de température de 0° à 350°, Petit et Dulong reconnurent ce fait important, que la capacité des corps pour la chaleur, ainsi que la dilatabilité, allaient en augmentant avec la température. Par le procédé de Meyer, ils déterminèrent la chaleur spécifique d'un certain nombre de corps simples, en la comparant aux poids atomiques, et établirent cette loi remarquable, que *tous les atomes des corps simples ont exactement la même capacité pour la chaleur;* mais à l'époque où cette loi parut, les poids atomiques des corps n'étaient pas bien fixés; on avait à opter entre plusieurs nombres, et Dulong et Petit crurent devoir prendre précisément les poids atomiques qui convenaient le mieux à la loi qu'ils voulaient produire. Il n'en est plus ainsi aujourd'hui, en raison des progrès de la chimie; aussi la loi annoncée ne se vérifie-t-elle pas, à beaucoup près, d'une manière aussi satisfaisante; car le produit de la chaleur spécifique, par les poids atomiques, au lieu d'être une quantité constante, variant de 36,75 à 38,30, varie de 25,53 à 75,18. Il devenait dès lors important de faire de nouvelles expériences, pour voir dans quelles limites la loi de Petit et Dulong devait être admise. C'est le travail qu'a exécuté M. Regnault, non-seulement pour les corps simples, mais encore pour les corps composés, en se servant de la méthode des mélanges, ayant rejeté celle du refroidissement fondée sur des hypothèses qui ne pouvaient être vérifiées : les résultats qu'il a obtenus sont généralement un peu plus forts que ceux de Dulong et Petit. En jetant les yeux sur le tableau qui les renferme, on voit de suite que la loi de la chaleur spécifique des atomes ne se vérifie pas d'une manière absolue; mais néanmoins M. Regnault l'adopte comme approchant de la vérité, en considérant que les poids atomiques des substances simples sur lesquelles on a opéré, varient de 200 à 1400, tandis que les produits des poids atomiques, par les chaleurs spécifiques, restent compris entre 38 et 42, limite assez restreinte. Les recherches sur la chaleur spécifique des corps composés, solides et liquides, l'ont conduit à des résultats absolument semblables qui peuvent être ainsi formulés :

1° *Dans les corps composés renfermant le même élément électro-négatif, et de constitution atomique semblable, les chaleurs spécifiques sont en raison inverse des poids atomiques.*

2° *Dans tous les corps composés, de même composition atomique et de composition chimique semblable, les chaleurs spécifiques sont en raison inverse des poids atomiques.* Ces lois ne sont pas complète-

ment d'accord avec le résultat de l'expérience; mais les divergences ne sont pas plus grandes que celles qui se présentent dans la loi des corps simples, puisqu'elles ne vont pas au delà du dixième au neuvième.

Les recherches relatives à la détermination de la chaleur spécifique des gaz présentent plus de difficultés que celles qui concernent les solides et les liquides, attendu, d'une part, que cette chaleur est toujours très-faible, et que, de l'autre, on peut l'envisager sous deux points de vue : 1° quand la pression reste constante, et que le gaz en s'échauffant peut se dilater ; 2° lorsque le volume reste constant, et que la force élastique augmente avec la température.

Crawford, Laplace, Lavoisier, Leslie et M. Gay-Lussac, ont employé diverses méthodes pour trouver la chaleur spécifique des gaz dans le premier cas ; mais les expériences n'ayant pas été faites avec le degré de précision convenable, l'Académie des sciences crut devoir proposer cette question en prix, qui fut remporté, en 1813, par MM. de la Roche et Bérard. Il résulte de leurs expériences, que les capacités calorifiques des gaz simples, à pression constante et à volumes égaux, sont les mêmes. On est parti de là pour conclure que les atomes des gaz simples, dans les mêmes circonstances, devaient avoir la même capacité, par la raison que les gaz, à la même température et sous la même pression, devaient contenir probablement, pour le même volume, le même nombre d'atomes.

On doit à MM. de la Rive et Marcet la détermination de la chaleur spécifique des gaz, à volume constant, en mesurant le temps du refroidissement ou de l'échauffement d'un même volume de gaz renfermé dans la même enveloppe et dans les mêmes circonstances; mais ce procédé n'a pas été reconnu suffisamment exact, pour que l'on puisse compter complétement sur les résultats obtenus.

A l'aide d'une méthode fondée sur la théorie du son, Dulong détermina le rapport des capacités calorifiques ; ce rapport entre effectivement dans la formule qui donne la vitesse du son dans un gaz. Dès lors, en trouvant le rapport des vitesses, il a pu calculer les rapports des chaleurs spécifiques ; la vitesse du son dans l'air étant égale à la vitesse théorique multipliée par la racine carrée du rapport de la capacité de l'air à pression constante à la capacité à volume constant, il devenait facile d'en déduire le rapport. C'est ainsi que Dulong a trouvé que le rapport des capacités était, pour l'air, 1,421 ; pour l'oxygène, 1,415 ; pour l'hydrogène, 1,407 ; pour le gaz acide carbonique, 1,338 ; pour l'oxyde de carbone, 1,427 ; pour l'oxyde d'azote,

1,345; et pour le gaz oléfiant, 1,240. On a reconnu depuis que, puisque les capacités à pression constante étaient connues, on pouvait passer à celles à volume constant, en déterminant le rapport des deux capacités. C'est ce qui a été fait au moyen de deux méthodes différentes : la première est due à MM. Clément et Desormes; la seconde, à Dulong. Les premiers ont déterminé le rapport en question, au moyen de la chaleur dégagée par une faible compression; ils ont trouvé pour le rapport des capacités calorifiques de l'air, à pression et à volume constants, 1,35; MM. Gay-Lussac et Welter, au moyen de la même méthode, ont obtenu 1,37244. Ces valeurs s'éloignent de la véritable, qui est 1,42; aussi cette méthode n'est-elle pas susceptible d'une exactitude suffisante.

Plusieurs questions se rattachent à la chaleur spécifique des gaz; savoir, la chaleur dégagée par leur compression, et les variations de leurs capacités calorifiques. Dans le premier cas, on a trouvé que tous les volumes égaux de fluide élastique, pris à la même température et à la même pression, étant comprimés ou dilatés de la même fraction de leur volume, dégagent ou absorbent la même quantité absolue de chaleur; dans le second, que les variations de température qui en résultent, sont en raison inverse de leurs capacités calorifiques, à volume constant : cette dernière loi est due à Dulong.

M. Gay-Lussac, qui s'est occupé des variations des capacités calorifiques des gaz, a reconnu que le rapport de la capacité calorifique, à pression constante, à la capacité du même gaz, à volume constant, ne change pas avec la pression et la température; il s'est appuyé, pour démontrer cette loi, sur ce fait, que la vitesse du son à Quito, sous une pression de $0^m,554$, est la même que celle qui résulte des expériences faites à Paris, sous une pression de $0^m,76$. MM. de la Roche et Bérard sont les seuls physiciens qui aient fait des expériences touchant l'influence de la pression sur la capacité calorifique. Ces expériences ont montré que cette capacité augmente avec la pression dans un plus faible rapport que les densités.

Quant à l'influence de la chaleur, M. Gay-Lussac a observé qu'elle augmentait avec la température; jamais la loi de cette augmentation n'a été déterminée.

Des vapeurs.

Il est une classe de corps dont nous n'avons pas encore parlé, et dont il est important d'étudier les propriétés calorifiques, en raison de leurs applications aux arts : ce sont les vapeurs.

Quand un liquide est abandonné à lui-même, soit dans le vide, soit dans l'air ou dans un gaz quelconque ; il se dissipe en plus ou moins de temps sous forme de vapeurs. Quelques corps, tels que les huiles grasses, sont privés de cette propriété; d'autres, comme l'acide sulfurique, exigent que l'on élève leur température ; à la température ordinaire, le mercure laisse échapper des vapeurs.

Si l'on observe la formation des vapeurs, dans le vide, comme l'a fait Dalton, on trouve que le liquide émet instantanément toute la vapeur qu'il peut former, à la température à laquelle on observe; que la force élastique de cette vapeur est indépendante de l'espace qui la renferme; que la vapeur, sur un excès de liquide, n'augmente ni de densité, ni de force élastique par la pression; que s'il n'y a pas assez de liquide pour que la vapeur sature tout l'espace, celui-ci se dilate comme un gaz.

La force élastique de la vapeur croît plus rapidement que celle du gaz permanent. De nombreuses expériences ont été faites pour déterminer la tension de la vapeur d'eau à diverses températures. M. Gay-Lussac a trouvé que la tension de la vapeur de la glace est la même que celle de l'eau à la même température. Des tables ont été faites pour donner les tensions de la vapeur depuis — 20° jusqu'à + 100°, c'est-à-dire, jusqu'à la température de l'ébullition. Des expériences ont été faites pour connaître la tension de la vapeur d'eau à des températures supérieures à 100°, d'abord par Dalton, puis par Clément, et enfin par Dulong et M. Arago, qui ont opéré à des pressions supérieures à huit atmosphères, dans des circonstances, par conséquent, où il y allait quelquefois de la vie. Ils ont porté dans leurs expériences, un degré d'exactitude dont on ne peut se faire une idée qu'en étudiant le mémoire qui renferme les résultats de leurs recherches; mémoire qui parut en 1830, et dans lequel on trouve une table des forces élastiques de la vapeur d'eau et des températures correspondantes, depuis une jusqu'à vingt-quatre atmosphères d'après l'observation, et de vingt-quatre à cinquante par le calcul.

Les vapeurs des différents liquides ont-elles des forces élastiques à des températures également éloignées de celle de leur terme d'ébullition ? C'est une question que Dalton avait résolue affirmativement ; mais l'exactitude de cette loi ne fut pas confirmée par des expériences subséquentes.

Si l'on cherche le rapport entre le poids d'un certain volume de vapeur et le même volume d'air, à la même pression et à la même température, on trouve que ce rapport est constant pour la même

nature de vapeur. Cette loi suppose que les vapeurs se comportent exactement comme les gaz permanents, quand on fait varier la pression et la température. Cette hypothèse n'est pas, peut-être, rigoureusement exacte; mais on l'admet jusqu'à ce que l'expérience ait prononcé.

La densité des vapeurs a besoin d'être envisagée souvent sous diverses pressions. On a appelé *densité absolue* de la vapeur formée par un liquide, le nombre constant qui exprime le rapport de deux volumes égaux de vapeur et d'air, à la même pression et à la même température. Divers procédés ont été imaginés pour déterminer les densités absolues des différentes vapeurs, d'abord par M. Gay-Lussac, puis par M. Dumas; et il résulte des expériences du premier, qu'un gramme d'eau pure produit $1^{l},6964$ de vapeur à 100°, sous la pression de $0,^{m}76$. Or, comme un volume d'eau d'un centimètre cube donnerait 1696 centimètres cubes de vapeur, il s'ensuit que la densité de la vapeur à 100° est à celle de l'eau, comme 1:1696. M. Gay-Lussac, d'une part, et M. Dumas, de l'autre, ont determiné la densité de diverses vapeurs.

Les capacités calorifiques des vapeurs ont été déterminées comme celles des gaz permanents. On doit à MM. de la Roche et Bérard la détermination de la capacité calorifique de la vapeur d'eau sous une pression de $1^{m},9660$.

Le mélange des gaz et des vapeurs produit des phénomènes qui ont été l'objet des investigations des physiciens. Dalton, qui s'est occupé de cette question, a reconnu, 1° que les vapeurs qui se développent dans les gaz, ne saturent pas instantanément l'espace occupé par le gaz; 2° que la force élastique d'un mélange de gaz et de vapeur est égale à la force élastique du gaz, plus celle de la vapeur, qui se développeraient dans le vide, à la même température; 3° que la quantité de vapeur qui se forme dans un gaz est égale à celle qui se formerait dans un même espace vide, à la même température. Il est facile d'expliquer la formation des vapeurs dans les gaz, comme dans le vide, à part le temps de la saturation de l'espace, à cause du défaut de continuité des gaz et de la condition d'homogénéité.

Hygrométrie.

L'hygrométrie se rattache à la question des vapeurs, puisqu'elle a pour but de déterminer les différents degrés d'humidité de l'air à l'aide d'instruments nommés *hygromètres* ou *hydroscopes*. On a appelé *état hygrométrique de l'air*, le rapport entre la quantité de

vapeur d'eau contenue dans l'air et celle qui s'y trouverait si l'air était entièrement satnré. On emploie différentes méthodes pour mesurer le degré d'humidité de l'air, en s'appuyant sur les principes suivants : 1° l'augmentation de poids de substances ayant une grande affinité pour l'eau ; 2° la quantité d'eau évaporée dans le même temps par la même surface ; 3° le froid produit par l'évaporation ; 4° le volume auquel l'air doit être réduit par la compression pour devenir saturé ; 5° l'abaissement de température que l'air doit éprouver pour atteindre le terme de sa saturation ; enfin, la contraction et la dilatation qne certaines snbstances organiques éprouvent par l'humidité de l'air. Les appareils construits d'après ces principes sont, ainsi que lenr usage, décrits dans tons les traités de physique auxquels nous renvoyons ; nous mentionnerons seulement un tableau dressé par M. Gay-Lussac, et renfermant les résultats des expériences faites avec l'hygromètre de Saussure, sur la force élastique de la vapeur correspondante anx degrés de l'hygromètre, à la température de 100° centigr., exprimée en centièmes de la tension à saturation. Les résultats consignés dans ce tableau montrent que l'allongement dn cheven n'est pas proportionnel à la quantité d'humidité de l'air. A l'aide de ce tableau, il est facile de déterminer le poids de la vapeur renfermée dans un volume d'air donné, quand on connaît la température et le degré de l'hygromètre. Les résultats obtenus à la température de 10° présentent quelque différence avec ceux qu'on aurait à une température plus élevée ; néanmoins on peut s'en servir quand on opère à des températures peu différentes de 10°. On peut encore résoudre diverses questions relatives à la présence des vapeurs dans l'air.

Des phénomènes produits dans les changements d'état des corps.

Qnand les corps changent d'état, il se produit une foule de phénomènes dont la connaissance intéresse au plus hant degré la physique générale et les arts ; nous allons tâcher de décrire les plus importants.

Un grand nombre de corps solides dont on élève suffisamment la température, se liquéfient ; dans ce cas, toute la chaleur communiquée devient latente, et n'agit point sur le thermomètre. Les corps qui se liquéfient par une action chimique, perdent une portion de leur chaleur sensible, qui devient chaleur latente ; de sorte que le mélange se refroidit. On trouve dans le *Traité de physique* de M. Pouillet, une table qui renferme la température de la fusion de dif-

férents corps *. On détermine la chaleur qui devient latente, par la même méthode qui sert à trouver la chaleur spécifique. Si le corps passe de l'état liquide à l'état solide, il se produit des effets calorifiques inverses.

L'eau, quand elle se congèle, présente des effets particuliers qui ont été étudiés à diverses époques. Quand un corps se refroidit, il se contracte; l'eau jouit de cette propriété jusqu'à 4° environ, puis au-dessous de cette température, le volume de l'eau augmente jusqu'au terme de la congélation, où il prend alors un grand accroissement qui est le 0,07 de volume à 0°. Les physiciens qui se sont occupés de cette question n'ont pas obtenu le maximum de densité au même degré; en effet, Hobbe trouva, par deux méthodes, 3°,33 et 3°,88; Tralès, 4°,35; Gilpin et Blagden, 3°,88; Lefèvre-Gineau, 4°,44; Hallestrum, 4°,1; et M. Despretz, récemment, 4°. Ce dernier résultat paraît être exact à $\frac{1}{100}$ de degré près.

On a cherché aussi le maximum de densité de diverses dissolutions. Voici les principaux résultats obtenus par M. Despretz :

Toutes les dissolutions salines, acides, alcalines ou alcooliques, ont un maximum de densité dont la température s'approche d'autant plus du terme de la congélation que la quantité de matière dissoute est plus grande; ce maximum se produit ensuite à des températures décroissantes au-dessous de celle de ce changement d'état, et ne peut, par conséquent, être observé qu'autant que l'on prend les précautions nécessaires pour refroidir la dissolution au-dessous de la température de la congélation, sans pourtant qu'elle change d'état. La marche du maximum est la même pour toutes les dissolutions; de plus, il baisse proportionnellement à la quantité de matière dissoute. L'eau n'est pas le seul corps qui atteigne un maximum de condensation avant de se solidifier; nous citerons encore le bismuth et la fonte de fer.

Toutes les fois que l'eau est privée d'air, on peut faire descendre sa température jusqu'à — 6°, sans qu'elle se congèle; si on la met dans un tube qui ne renferme que de l'air raréfié, et qu'on recouvre sa surface d'huile, on fait descendre le terme de la congélation jusqu'à — 12°.

Un liquide passe à l'état de vapeur, soit par l'action de la chaleur, soit par l'effet de la tension qu'acquièrent les liquides à toutes les températures. Dans le premier cas, le liquide peut se trouver dans un vaisseau ouvert ou dans un vase clos. Si le vaisseau est ouvert,

(*) Tome I, p. 486.

il se produit une foule d'effets qui ont été analysés avec soin et que nous allons rapporter.

1° La température de l'ébullition varie avec la pression de l'atmosphère, puisque l'ébullition n'a lieu que lorsque la force élastique de la vapeur est égale à cette pression.

2° Si l'ébullition avait lieu dans des chaudières de dix mètres quarante cent. de hauteur, la tension de la vapeur au fond de la chaudière supportant deux atmosphères, les couches supérieures marqueraient 100°, les couches inférieures, 122°.

3° L'eau entre en ébullition à des températures plus élevées dans des vases de terre et de verre que dans des vaisseaux métalliques; la différence va quelquefois jusqu'à 1° et 1°,5.

4° Lorsque l'on fait tomber des gouttes de liquide, d'eau par exemple, dans des capsules de platine, d'argent, de fer, chauffées au rouge blanc, il se produit un effet curieux, observé en 1756 par Leiden Frost : les gouttes se réunissent en une seule, et prennent un mouvement rapide de rotation ; l'évaporation est d'autant plus lente, que la capsule a été plus chauffée. Ce phénomène a également lieu avec l'alcool, l'éther, les huiles essentielles, etc.

5° Le terme de l'ébullition de l'eau dépend de la nature des substances qu'elle tient en dissolution ; on en a la preuve dans le tableau de l'ébullition de différents liquides sous la pression ordinaire (*).

Passons à l'ébullition en vases clos ; voici les principaux effets observés, et qui ont une grande importance pour les arts :

1° La température à laquelle commence l'ébullition est d'autant plus élevée que la pression est plus grande ; dès lors, la force élastique de la vapeur croît dans un certain rapport.

2° La vapeur qui se forme retarde l'ébullition jusqu'à une certaine température, à laquelle tout le liquide se vaporise. Cette température est celle pour laquelle la densité de la vapeur est égale à la densité du liquide, multipliée par le rapport du volume du liquide à celui du vase. M. Cagniard de la Tour a effectivement trouvé que l'éther se vaporisait en vase clos à 150°, dans un espace moindre que le double de son volume, et qu'il en résultait une pression de soixante-dix atmosphères. D'autres liquides ont présenté le même phénomène.

La formation de la vapeur est modifiée suivant les circonstances où elle est produite. Nous citerons particulièrement la pression inférieure

(*) Peclet, *Traité de physique*, t. I, p. 497.

à celle de l'atmosphère ; l'exposition des liquides dans des milieux plus ou moins saturés de vapeurs de ces mêmes liquides, et d'où résulte un abaissement de température qui peut aller jusqu'à la congélation. L'évaporation spontanée qui se produit alors dépend de la température de l'air, de l'état hygrométrique de celui-ci, et de son déplacement par des causes quelconques.

La chaleur employée pour maintenir les liquides à l'état de vapeur a été nommée chaleur latente, parce qu'elle maintient l'écartement des molécules. M. Despretz, qui a déterminé la chaleur latente des vapeurs de l'eau, de l'alcool, de l'éther sulfurique et de l'essence de térébenthine, a reconnu qu'un liquide, parvenu au point d'ébullition, exige d'autant moins de chaleur pour se vaporiser, que la densité de sa vapeur est plus grande, et que les chaleurs latentes des diverses vapeurs sont sensiblement, en raison inverse de leur densité, au point d'ébullition.

La chaleur de vaporisation a été déterminée par divers physiciens, Rumfort, Dulong, Clément et Desormes, Southern et Wat; les résultats qu'ils ont obtenus varient de 527 à 557.

Diverses circonstances influent sur le retour à l'état liquide des vapeurs qui saturent un espace; nous citerons particulièrement l'abaissement de température ou une augmentation de pression : si l'espace n'est pas saturé, un abaissement de température ou une augmentation de pression plus ou moins grande n'entraîneraient pas le retour de la vapeur à l'état liquide.

CHAPITRE VIII.

De la Pesanteur.

Il n'a été question jusqu'ici que des fluides impondérables, qui n'agissent sur les molécules des corps qu'à de petites distances pour en modifier les propriétés : nous allons nous occuper actuellement de forces d'une autre nature, qui agissent, soit à grande, soit à petite distance, non pas pour modifier leurs propriétés, mais pour produire des actions attractives dont les lois sont connues. Peut-être ces forces tirent-elles leur origine de l'éther diversement modifié.

Dans l'impossibilité de remonter à la cause des phénomènes produits, il faut se borner à étudier les effets et les lois qui les régissent. On a nommé *attraction*, cette tendance d'un corps à se porter vers un autre; si la tendance s'exerce à de grandes distances, on nomme cette force *attraction*, *pesanteur*; si elle agit, au contraire, à de petites distances, on l'appelle *attraction moléculaire*, *affinité*, selon qu'elle exerce son action entre des molécules similaires ou dissemblables. On a un exemple de l'effet de la pesanteur, quand un corps, n'étant retenu par aucun obstacle, tombe sur la terre. Les anciens avaient imaginé différents systèmes pour expliquer cette chute des corps; mais nous ne mentionnerons que celui de Descartes, qui est le plus ingénieux et le plus séduisant de tous. Suivant lui, ce phénomène dépend du mouvement de la matière subtile qui tourbillonne autour de la terre; toutes les parties du tourbillon étant animées d'une force centrifuge qui les porte à s'éloigner de la terre, doivent chasser les corps en sens inverse, dans une direction contraire à celle que leur imprime le mouvement de rotation. Cette explication, à laquelle on fit de sérieuses objections, disparut complétement quand Newton eut découvert le principe de la gravitation universelle, d'après lequel il a montré que le soleil exerçait son action sur les planètes, et celles-ci sur leurs satellites.

On considère la pesanteur comme une force agissant sans cesse sur chacune des molécules d'un corps; la vitesse avec laquelle ce corps tombe, ne dépend pas de la masse du corps, puisqu'une partie détachée du corps serait animée de la même vitesse; ainsi, quand la masse est plus grande, il y a un plus grand nombre de parties animées de la même vitesse. La pesanteur doit donc se mesurer par la vitesse qu'elle imprime dans un temps donné à chaque molécule d'un corps; l'effet employé pour le retenir dans sa chute est appelé *poids*, lequel peut servir à évaluer la quantité de molécules contenues dans le corps; dès lors, le poids doit être égal au produit de la masse par la vitesse : la masse étant connue, la vitesse s'en déduit, et *vice versâ*.

Quand un corps est mû par une cause quelconque, il continue à cheminer dans la même direction, avec la même vitesse, si aucune cause étrangère n'intervient pour modifier l'impulsion qu'il a reçue. Mais si la force agit continuellement, d'une manière uniforme, la vitesse du mouvement devra croître à chaque moment, et uniformément. C'est précisément ce qui arrive quand un corps tombe vers la terre; la vitesse croît alors comme le temps, et les espaces parcourus sont entre eux comme les carrés du temps. On a trouvé, par l'expé-

rience, qu'un corps sur lequel l'air n'oppose aucune résistance, parcourt dans la première seconde environ 4^{m},9044.

On déduit du mouvement uniformément accéléré qui résulte de la pesanteur, que l'espace parcouru pendant un temps donné, est la moitié de celui que le mobile serait capable de décrire, si la vitesse acquise était uniforme. C'est à Galilée que l'on doit la loi suivant laquelle la pesanteur agit sur les corps placés à peu de distance de la terre. Mais cette loi ne suffisait pas pour trouver le principe de la gravitation universelle; il fallait encore posséder celles auxquelles sont soumis les mouvements de tous les corps célestes. Cette grande découverte fut faite par Képler. Voici les lois qui régissent ces mouvements : 1° les planètes se meuvent dans des courbes planes, et leurs rayons vecteurs décrivent des espaces proportionnels aux temps; 2° les orbites des planètes sont des ellipses, dont le soleil occupe un des foyers; 3° les carrés des temps des révolutions sont proportionnels aux cubes de leurs grands axes. Newton, en combinant ces trois lois, en fit jaillir la loi qui régit la nature entière. Ayant soupçonné que la pesanteur, qui paraissait avoir la même intensité, à peu de distance de la terre, ou sur la cime des plus hautes montagnes, devait s'étendre à des distances considérables dans l'espace, et diminuer alors d'intensité, il supposa d'abord que cette action s'étendait jusqu'à la lune, et qu'en se combinant avec le mouvement de projection de ce satellite, elle devait décrire un orbe elliptique autour de la terre. En soumettant cette idée au calcul, et prenant en considération le mouvement de la lune dans son orbite, le rapport entre le rayon de la terre et celui de cette orbite, Newton détermina, de combien la pesanteur devait être diminuée, pour qu'il y eût production des effets observés; il trouva alors que la loi de la pesanteur suivait la raison inverse du carré de la distance; loi qu'il étendit jusqu'au soleil, qu'il considéra comme le foyer d'une force se propageant indéfiniment dans l'espace, et agissant en *raison directe des masses, et en raison inverse du carré de la distance,* sur tous les corps placés dans le système solaire, en même temps que ces corps exerçaient les uns sur les autres de semblables actions. De là ce principe général, que toutes les molécules de la matière s'attirent mutuellement à distance, en *raison directe des masses, et en raison inverse du carré de la distance.*

Nous passons sous silence une foule de questions secondaires qui peuvent être facilement résolues, au moyen du principe de la gravitation universelle. Ce principe, facile à vérifier relativement à l'action exercée par la terre sur les corps qui sont abandonnés à cette action,

présentait cependant quelques difficultés dans sa vérification à l'égard de deux corps de petite dimension. Cavendish résolut cette question, à l'aide d'une méthode, dont l'idée appartient à Micheli, de la Société royale de Londres; cette méthode consiste à mesurer les effets de l'attraction mutuelle de deux corps, en rendant l'un d'eux d'une mobilité suffisante pour obéir à l'action de l'autre. Il se servit pour cela de la balance de torsion, employée par Coulomb, pour déterminer les lois des attractions et répulsions électriques et magnétiques. Les résultats ont été consignés dans les *Transact. philosop.* pour 1798. C'est par ce moyen qu'il parvint à montrer que la densité de la terre était cinq fois et demie plus grande que celle de l'eau.

La pesanteur varie en différents points de la surface de la terre. On est parvenu à déterminer ces variations au moyen du pendule. Il existe, en effet, une relation telle entre la durée des oscillations d'un pendule, sa longueur et l'intensité de la pesanteur, que l'on peut déduire l'une d'elles de la formule qui lie ces trois quantités quand les deux autres sont connues. Quand les oscillations d'un pendule sont très-petites, leur durée est indépendante de leur amplitude, du poids et de la nature de la boule; les durées sont entre elles comme les racines carrées des longueurs des pendules. Si donc l'on compte pendant un temps donné, pris pour unité, le nombre d'oscillations qu'effectue le pendule, on en déduit alors la durée d'une oscillation avec une précision d'autant plus grande que le nombre des oscillations a été plus considérable. Borda est le premier physicien qui ait donné une méthode exacte pour observer le pendule. Il fit ses expériences à l'Observatoire de Paris en 1790; MM. Biot, Bouvard et Mathieu répétèrent les mêmes expériences en 1808, et MM. Arago et de Humboldt en 1818, en employant d'autres procédés. Les uns et les autres parvinrent aux mêmes résultats que Borda, c'est-à-dire, que l'intensité de la pesanteur, à Paris, était égale à $9^m,8088$, valeur qui indique qu'un corps qui tomberait dans le vide pendant une seconde aurait une vitesse telle, que, si on l'abandonnait ensuite à lui-même, il parcourrait cette distance pendant les secondes suivantes. Dès lors, l'espace parcouru pendant cette seconde serait égale à $4^m,9044$. L'emploi de la formule citée plus haut exige deux choses : la mesure de la durée des oscillations du pendule, et la détermination de la longueur du pendule simple; opérations qui demandent les plus grands soins si l'on veut comparer l'intensité de la pesanteur en divers lieux sur la surface du globe, là surtout où il n'y a que de faibles différences. Pour faire cette comparaison, il suffit de faire osciller le

même pendule, dans les mêmes circonstances, en différents lieux; et, comme alors la longueur du pendule simple est la même, il s'ensuit que la durée des oscillations variera en raison inverse de la racine carrée de l'intensité de la pesanteur. Dès lors, il devient facile, connaissant l'intensité d'un des lieux, d'en déduire celle des autres points. Ces expériences permettent aussi de déterminer la longueur du pendule simple. Ce pendule est idéal, puisqu'il se composerait d'un fil inextensible et sans pesanteur, à l'extrémité duquel se trouverait une molécule de matière pondérable; mais d'après ce que nous venons de dire, on détermine la longueur par une méthode indirecte. A Paris, la longueur du pendule sexagésimal, d'après Borda, est de $993^{mm},8267$; à Londres, elle est de $994^{mm},1147$, d'après Kater.

On a reconnu que la pesanteur allait en diminuant, des pôles à l'équateur, de $\frac{1}{176}$ de sa valeur moyenne. Deux causes contribuent à cette diminution : l'aplatissement de la terre aux pôles et la force centrifuge. Nous sommes amené naturellement à dire quelques mots de la figure de la terre. Si l'on fait abstraction des inégalités qui se trouvent à la surface du globe, et qui peuvent être négligées relativement à son diamètre, la surface peut être considérée sensiblement comme régulière. Les anciens avaient déjà une idée de la courbure de la terre, qu'ils supposaient sphérique, n'ayant aucun moyen de déterminer au juste ses véritables dimensions; cependant, ils les avaient déterminées avec quelque approximation. Ce fut Newton qui annonça que la terre devait être aplatie aux pôles, et par conséquent renflée à l'équateur. Cette déduction de l'analyse a été vérifiée depuis par de nombreuses expériences.

On détermine la figure de la terre non-seulement avec le pendule, comme nous venons de le dire, mais encore au moyen d'opérations géodésiques. A cet effet, on prend pour points de repère des pointes de rocher, des sommets d'édifices, tellement situés que, de l'un de ces points, on puisse au moins en apercevoir deux autres. On choisit ensuite une base d'opération que l'on mesure avec la plus grande exactitude, puis on enchaîne tous les points par des triangles dont on mesure les angles avec précision. On peut ainsi couvrir une vaste étendue avec des réseaux de triangles. Cette opération a été faite sur toute la surface de la France, en Angleterre, en Allemagne et en Italie. Ce système de triangulation a été exécuté dans le reste de l'Europe, en Amérique, et même en Asie, dans l'Inde. En continuant cette opération sur toute la surface de la terre, on finira par connaître sa surface. Cette méthode, au moyen de laquelle on prouve

que la terre est aplatie aux pôles, sert encore à déterminer l'étendue de cet aplatissement. Voici comment on y est parvenu. Prenons pour exemple des observations faites à Paris et à l'île de Formentera. On a trouvé que, sur le méridien de Paris, la verticale du parallèle de Formentera avec celle du parallèle de Dunkerque, font entre elles un angle de 12°22'14''. Ces deux lignes, prolongées, se rencontreraient au centre de la terre, ou à peu de distance. Si du point de rencontre on décrit un arc de cercle passant par les deux stations, cet arc sera de 12°,22'14''. Or, au moyen de la triangulation, on trouve que la distance entre ces deux points est de 1374438^{m},72 comptée sur cet arc. Rien n'est plus simple que d'en déduire la distance pour un degré. Cette distance est appelée la longueur d'un degré du méridien. Dans le cas où la terre serait sphérique, la longueur d'un degré sur tous ses points, en un lieu quelconque du globe, serait la même ; mais il n'en est pas ainsi ; car on trouve que les degrés de l'équateur sont plus petits que les degrés des pôles, ce qui prouve d'une manière incontestable l'aplatissement des pôles à l'équateur. Un grand nombre d'observateurs ont mesuré divers méridiens, et à plusieurs latitudes, des arcs de plusieurs degrés; tous les résultats obtenus concourent à donner une idée et à faire connaître la figure de la terre. Nous citerons les observations de Bouguer et la Condamine au Pérou, de Lambton dans l'Inde, de Lacaille au cap de Bonne-Espérance, de Mason et de Dickson en Pensylvanie, de Lemaire et de Boscowich en Italie, de Delambre et de Méchin, de MM. Biot et Arago en France, en Espagne, et sur les côtes de la Méditerranée, de Roy, de Lambre et Méchin en Angleterre, près de Greenwich, de Melanderhielm en Suède. De toutes les observations faites, on en déduit les résultats suivants :

Rayon de l'équateur..................	6376984 mètres.
Rayon du pôle........................	6356324
Différence...........................	20660

On déduit de là que l'aplatissement est $\frac{1}{308,65}$, et que le rayon moyen correspondant à une latitude de 45° est de 6366194.

Bouguer, pour observer les effets de l'attraction de la terre sur tous les corps, a cherché si les montagnes n'exerceraient pas par hasard une action sur le fil à plomb, capable de le faire dévier de la verticale. Ses prévisions ont été confirmées par les expériences qu'il fit sur les flancs du Chimborazo, une des plus hautes de la terre, et trouva dans le fil à plomb une déviation de 7 ou 8'' ; on a pensé que

ces montagnes, qui sont volcaniques, devaient renfermer de grands vides, et que dès lors les résultats obtenus étaient moindres que si la montagne eût été pleine; en effet, Maskeline, en 1772, trouva qu'au pied des monts Shéhalliens, beaucoup moins élevés que le Chimborazo, la déviation était de 54″. On est donc porté par là à admettre que la déviation du fil à plomb doit dépendre et du volume et de la nature des substances dont les montagnes sont composées. En comparant la masse de la terre à celle de la montagne, Maskeline en conclut que la densité de la terre était quatre fois et demie celle de l'eau, valeur à laquelle est parvenu également Cavendish au moyen de la balance de torsion.

Action de la pesanteur sur les liquides et les gaz.

Les liquides, en raison de la mobilité de leurs parties qui leur permet de se déplacer plus ou moins facilement, sont soumis à l'action de la pesanteur; dès lors leurs propriétés physiques doivent dépendre de cette force et de l'attraction de leurs molécules. La première de ces propriétés est connue sous le nom de *principe d'égalité de pression*, en vertu duquel un liquide placé dans un vase transmet à tous les points de ce vase les pressions qu'éprouve la surface. Cette pression est proportionnelle à l'étendue de la surface. La seconde propriété est celle qui concerne l'équilibre des liquides. Pour que cet équilibre ait lieu, la surface doit être horizontale, c'est-à-dire, perpendiculaire à la force qui sollicite les molécules, et une molécule quelconque doit éprouver de chaque côté une pression opposée. Il résulte du principe *d'égalité de pression*, que la pression exercée sur le fond d'un vase est égale au poids d'une colonne liquide qui aurait pour base le fond lui-même, et pour hauteur celle du niveau.

On considère, dans l'équilibre des liquides, le centre de pression ou point d'application de toutes les pressions élémentaires. Ce point est placé naturellement plus bas que le centre de gravité, attendu que les forces vont en croissant à mesure que l'on descend. Les gaz, comme tous les corps, sont, ainsi que les liquides, soumis à l'action de la pesanteur et des forces moléculaires. On en a une preuve patente dans les déplacements fréquents qu'éprouve l'air, et d'où résultent des effets si divers. La pesanteur de l'air, démontrée par Galilée, a été confirmée par Toricelli, au moyen d'un tube de verre fermé par un bout, rempli de mercure, et renversé dans un bain de ce métal; la colonne de mercure s'abaissa dans le tube, et servit évi-

demment de mesure à la hauteur de l'atmosphère ; puis par Pascal au moyen de sa fameuse expérience sur le Puy-de-Dôme, laquelle a démontré que la colonne de mercure s'abaissant à mesure que l'on s'élevait dans l'atmosphère, la pression de celle-ci diminuait à mesure que l'on parvenait à des stations plus élevées.

Pour qu'un gaz soit en équilibre, il faut seulement que sa force élastique soit la même dans toute l'étendue d'une couche de niveau. Si rien ne s'oppose à cette force, le gaz s'étend. Il semblerait donc, d'après cela, que l'atmosphère ne serait pas limitée à douze ou quinze lieues, comme on l'a avancé, car rien ne paraîtrait s'opposer à ce que les molécules de l'air ne se précipitassent dans le vide, et ne se répandissent dans l'immensité des cieux. Mais nous avons en optique des phénomènes qui ne peuvent s'expliquer qu'en admettant que l'atmosphère ait une limite. Quant à la pression atmosphérique, on voit du reste que la colonne de mercure du tube de Toricelli peut servir à la déterminer, ainsi que les variations qu'elle éprouve quand cette colonne monte ou descend. Le tube de Toricelli, auquel on a adapté une échelle, constitue notre baromètre. Cet instrument est tellement connu que nous nous dispenserons d'aucuns détails sur sa construction et son usage. Passons aux conséquences générales déduites des observations faites avec le baromètre. Cet appareil, en montrant les variations de pression qu'éprouve l'atmosphère, indique conséquemment tout ce qui se passe dans les hautes régions de l'air toutes les fois que cette pression change. Parmi les variations diverses qui surviennent, on en distingue particulièrement deux espèces, les variations accidentelles et les variations horaires. Quant aux premières, elles ont lieu très-irrégulièrement, et l'on ne peut en prévoir ni l'époque ni l'étendue; les secondes sont toujours les mêmes à des heures marquées.

On doit à Laplace une théorie de l'équilibre barométrique, et à MM. de Humboldt et Ramon une foule d'observations propres à fixer les idées sur les avantages du baromètre pour l'étude de la météorologie et pour les grands nivellements géographiques. Ramon a établi qu'il existe dans la journée une heure où la hauteur du baromètre est très-sensiblement la hauteur moyenne du jour, laquelle est la moyenne des observations faites d'heure en heure pendant les vingt-quatre heures de la journée; l'heure trouvée par Ramon est midi; en connaissant les hauteurs moyennes de chaque jour, on peut prendre la hauteur moyenne du mois, ainsi de suite. Il a, en outre, démontré que, dans nos climats, on ne peut trouver les varia-

tions horaires qu'en déterminant les moyennes mensuelles ou annuelles correspondantes à de certaines heures de la journée. Sous l'équateur, on peut observer directement ces variations, et M. de Humboldt y a reconnu que le maximum de hauteur correspond à neuf heures du matin, et que le baromètre descend ensuite jusqu'à quatre heures ou quatre heures et demie de l'après-midi, instant où il atteint son minimum; il remonte ensuite jusqu'à onze heures du soir, où il atteint un second maximum, et redescend enfin jusqu'à quatre heures du matin. Les mouvements oscillatoires du mercure sont tellement réguliers qu'ils pourraient servir à marquer les heures. M. de Humboldt évalue à deux millimètres la distance entre la plus grande élévation et le plus grand abaissement. Nous ajouterons que Ramon, qui a éprouvé tant de difficultés à reconnaître dans nos climats les variations horaires masquées par les effets de tant de causes perturbatrices, a trouvé qu'en hiver le maximum est à neuf heures du matin, le minimum à trois heures de l'après-midi, et que le second maximum est à neuf heures du soir. En été, le maximum a lieu avant huit heures du matin, le minimum à quatre heures de l'après-midi, et le second maximum à onze heures du soir. Au printemps et en automne, les deux maxima et les deux minima sont intermédiaires ; à l'équateur, l'étendue absolue des variations est un peu moindre. Quant aux rapports qui peuvent exister entre les variations du baromètre et les changements survenus dans l'atmosphère, c'est une question de l'application de la physique à la météorologie, dont il sera traité dans cet ouvrage.

De la compressibilité des gaz.

La conséquence de l'élasticité des gaz est la compressibilité, c'est-à-dire, la faculté d'occuper un volume moindre quand on leur oppose une force plus grande que celle qui mesure leur élasticité. D'après Mariotte, les volumes des gaz sont en raison inverse des pressions qu'ils supportent : cette loi a été trouvée à peu près à la même époque par Boyle, en Angleterre, et a été vérifiée par Dulong et M. Arago jusqu'à vingt-sept atmosphères, et pour des températures très-basses et très-élevées. Mais on pense qu'il est probable qu'elle n'existerait pas à toutes les températures et à toutes les pressions, attendu que certains gaz, que l'on regardait comme permanents, se sont liquéfiés quand on les a mis sous une certaine pression, ou que l'on a suffisamment abaissé leur température. Cette loi existe encore pour des mélanges de gaz qui ne sont pas susceptibles de réagir chimi-

quement les uns sur les autres, soit immédiatement, soit par l'effet de la pression. On se sert, pour enlever l'air d'un récipient, le comprimer ou le dilater, d'instruments nommés *machines pneumatiques, de compression*, dont on trouve dans tous les traités de physique la description, ainsi que celle des divers instruments qui s'y rapportent. Nous ne ferons pas mention également des pompes diverses en usage dans les arts, et dont la construction et les effets reposent sur les principes précédemment énoncés.

De la pesanteur spécifique, ou densité des liquides et des gaz.

Pour compléter ce que nous avons à dire sur la pesanteur, il nous reste à parler du principe sur lequel on s'appuie pour trouver la pesanteur spécifique des corps solides, liquides et gazeux, et de l'écoulement des liquides par des orifices à minces parois, ainsi que de l'écoulement des gaz. Le principe, à l'aide duquel on trouve la densité d'un corps, est dû à Archimède, et est ainsi défini :

Un corps plongé dans un fluide y perd une partie de son poids, égale au poids du volume du fluide qu'il déplace; le même principe se vérifie quand on substitue un gaz au liquide. La pesanteur spécifique est le poids du corps comparé à celui du volume d'eau déplacé pris pour unité.

On a construit des appareils divers pour faire les déterminations mentionnées ci-dessus; ils ont reçu en physique le nom de *balances hydrostatiques*. La densité des liquides s'obtient d'après les mêmes principes, c'est-à-dire, que l'on compare le poids des liquides à celui d'un égal volume d'eau. Il suffit de peser successivement, vide et plein d'eau distillée, un flacon bouché à l'éméril; la différence de poids donne le poids du volume d'eau qu'il renferme. On pèse ensuite le vase plein du liquide dont on veut déterminer la densité; la différence entre le poids et celui du flacon vide donne le poids du liquide, et on obtient ainsi facilement la densité.

La densité des gaz s'obtient au moyen de divers procédés; on la rapporte à celle de l'air atmosphérique à la pression de $0^m,76$, et à la température de la glace fondante. Dès lors, il suffit de connaître les poids d'un même volume d'air et de gaz à 0° de température, et 0,76 de pression. Nous renvoyons également aux traités de physique pour la description et l'usage des appareils.

Du mouvement des liquides ou des gaz.

Il est bien difficile, dans une introduction historique, d'exposer,

même en peu de mots, les mouvements auxquels sont assujetties les diverses parties d'un liquide dans un réservoir, quand il s'écoule par une ouverture en minces parois ; quelques faits généraux suffiront cependant pour caractériser ce mouvement.

En répandant dans le liquide des corps d'un petit volume et de la même densité, afin qu'ils puissent être tenus en suspension, dès l'instant que le liquide commence à sortir, on voit les molécules liquides se mouvoir verticalement, jusqu'à quelques centimètres de l'orifice, après quoi elles se dirigent vers lui. Or, comme il doit toujours passer dans le même temps la même quantité de liquide par toutes les tranches horizontales, à chaque instant la vitesse moyenne dans chacune des tranches doit être en raison inverse de sa surface. Pendant que l'écoulement a lieu, le liquide n'est pas toujours terminé par une surface horizontale. Si le jet sort verticalement par un orifice placé au fond, et que le niveau soit descendu à une petite distance de l'orifice, le liquide s'écarte de l'axe de ce dernier, et forme un entonnoir dont le sommet répond à son centre. Quant à l'écoulement par des orifices à minces parois, et à la constitution des veines liquides, nous ne pouvons que renvoyer aux travaux de M. Savart ; les phénomènes sont tellement complexes, qu'il nous est impossible d'en donner une idée, même succincte, sans rapporter les nombreux résultats auxquels il est parvenu.

La vitesse de l'écoulement a été déterminée par l'expérience et le calcul ; on voit, par l'expérience, que cette vitesse, nulle au premier instant de l'écoulement, s'accroît d'une manière continue, pendant un certain temps, après lequel elle devient uniforme, si le niveau reste constant, ou décroît si le niveau s'abaisse. On reconnaît, par le calcul, que lorsque le diamètre de l'orifice est très-petit, relativement à celui du vase, la vitesse du liquide qui s'écoule est égale à celle qu'un corps solide acquerrait en tombant d'une hauteur égale à la distance du centre de cet orifice au niveau de ce liquide. Cette loi a été vérifiée par l'expérience.

Les expériences faites pour évaluer la dépense par des orifices percés en minces parois, ont conduit aux résultats suivants, en disposant toutefois les appareils pour que la hauteur du liquide fût constante :

1° La forme de l'orifice est sans influence, à moins que son contour ne présente des angles rentrants ; 2° pour des orifices percés en minces parois, dont le diamètre excède dix millimètres, la section contractée est à peu près égale à 0,6 de la surface de l'orifice ; 3° pour les orifices très-petits, la section contractée est un peu plus grande, ce qui pro-

vient probablement de ce que l'épaisseur de la paroi devient alors sensible, et qu'il se produit un effet analogue à celui qui résulte des ajutages; 4° avec le même orifice, la dépense est plus grande, quand la surface dans laquelle il est percé est concave en dedans, que lorsqu'elle est plane, et c'est le contraire quand cette surface est convexe.

Nous aurions encore à parler du choc des veines contre des obstacles fixes, du choc des veines entre elles; mais nous préférons renvoyer aux travaux déjà cités de M. Savart, par les motifs précédemment énoncés.

Si l'on place sur l'orifice d'écoulement des ajutages (ou tuyaux additionnels), il peut se faire que la veine passe sans toucher l'ajutage ou en le touchant. Dans le premier cas, la dépense n'est point changée. Si la veine adhère à l'ajutage, l'écoulement se fait alors à plein orifice; dans le cas où l'ajutage est cylindrique, et que sa longueur n'excède pas quatre fois son diamètre, la quantité de liquide écoulé est augmentée d'un tiers; avec un ajutage évasé, la dépense est encore plus considérable; en plaçant l'ajutage dans l'intérieur, elle est diminuée.

Dans les tuyaux capillaires, la vitesse est beaucoup plus diminuée que dans les tuyaux dont le diamètre a une certaine dimension, en raison du frottement qui agit directement sur le liquide adhérent aux parois. Toutes les fois qu'un liquide ne mouille pas les parois d'un tuyau, il cesse complétement de s'écouler sous la même pression pour la même longueur. Si le liquide, au contraire, mouille les parois du tube, l'écoulement ne cesse point; mais il se ralentit en allongeant le tube ou diminuant son diamètre; nous ajouterons que la vitesse est la même que l'extrémité du tube débouche dans l'air ou dans un liquide de même nature. La dépense augmente avec la température, et les inégalités de vitesse d'écoulement ne dépendent pas de la viscosité, puisque l'alcool coule moins vite que l'eau, et que l'eau sucrée et l'huile de térébenthine coulent plus vite que l'eau. Jusqu'ici, on n'a pu déterminer la cause de la différence que présentent les liquides à cet égard.

Le mouvement des corps gazeux est dû à plusieurs causes: à l'action de la chaleur, au mouvement des corps solides ou liquides, qui leur transmettent une partie de leur vitesse; enfin, à la compression. Ces diverses causes produisent des effets particuliers qui sont décrits dans les traités de physique. Nous mentionnerons seulement les conséquences auxquelles on a été conduit, en observant de quelle manière un gaz comprimé s'échappe par une ouverture quelconque percée en mince paroi. On a reconnu d'abord que la vitesse d'écoulement dépend de la

différence des pressions intérieure et extérieure, et de la densité du gaz qui s'écoule ; à la même température, et quelle que soit la pression, un même gaz s'écoule dans le vide avec la même vitesse ; les vitesses d'écoulement des gaz dans le vide sont en raison inverse des racines carrées des densités. Tous ces résultats ont été vérifiés par un grand nombre d'expériences. Enfin, pour les gaz qui s'écoulent par de longs tuyaux, la vitesse est beaucoup plus petite que lorsque l'écoulement a lieu par des orifices percés en mince paroi, et d'autant plus que les tuyaux sont plus longs, d'un plus petit diamètre, et que la vitesse est plus grande. Nous ne pouvons que mentionner ces résultats, qui exigeraient de trop grands développements, si nous voulions essayer d'en donner même une idée succincte. Nous croyons avoir rapporté les faits les plus importants relatifs à la pesanteur dont nous pourrons avoir besoin dans le cours de cet ouvrage; ainsi nous ne nous étendrons pas davantage sur ce point.

CHAPITRE IX.

Des phénomènes capillaires.

Outre l'attraction des masses à de grandes distances, on considère encore l'attraction à de petites distances, ou attraction moléculaire, à laquelle on doit attribuer divers phénomènes, entre autres l'adhérence de deux corps plans polis que l'on glisse l'un sur l'autre, et les actions capillaires.

Toutes les fois qu'un corps solide est en contact avec un liquide capable de le mouiller, il se manifeste aussitôt une action attractive, en vertu de laquelle il y a adhérence entre les deux corps. C'est ainsi que se comporte le verre à l'égard de l'eau, de l'alcool et des huiles. Cette force, qui se développe au contact des solides et des liquides, a la plus grande analogie avec celle qui produit les affinités, puisque, dans certains cas, elle peut opérer des décompositions chimiques. C'est ainsi que le charbon et différents corps poreux jouissent de la propriété, quand on les plonge dans de l'eau colorée par une infusion de bois de campêche, de tournesol, d'enlever la matière colorante, par suite d'une plus grande affinité de celle-ci pour le corps poreux que pour l'eau.

L'action capillaire se manifeste dans des circonstances qui ont servi

à caractériser le phénomène. Lorsque l'on plonge un tube de verre d'un petit diamètre ou capillaire dans un liquide qui le mouille, l'on voit aussitôt l'eau s'élancer dans l'intérieur, et y demeurer suspendue à une hauteur dépendante du diamètre du tube et de la nature du liquide; la surface qui termine ce dernier à la partie supérieure est concave. La surface du liquide à l'extérieur s'élève également au-dessus de son niveau dans les parties contiguës au tube, de manière à former alentour une surface annulaire concave. Au lieu d'un tube, si l'on plonge une lame de verre, la partie adjacente du liquide s'infléchit en se relevant vers chaque face, de manière à former une surface annulaire concave. Mais dans l'expérience du tube, si l'on emploie un liquide qui ne mouille pas, tel que le mercure, les changements de figure et de position que subit la surface du mercure se font en sens opposé, c'est-à-dire que le mercure s'abaisse au-dessus de son niveau, et que sa surface supérieure est convexe. L'expérience montre qu'un même liquide s'élève dans différents tubes homogènes capables d'être mouillés par lui, à des hauteurs qui sont, à très-peu près, en raison inverse du diamètre des tubes. L'abaissement du mercure au-dessous de son niveau, suit la même loi. L'expérience montre encore que les hauteurs auxquelles s'élèvent différents liquides dans le même tube, ne sont pas en raison de leur densité, car l'alcool et les huiles s'élèvent moins que l'eau; cependant pour le même liquide les différences de niveau paraissent être en raison directe des densités; si l'on enduit préalablement l'intérieur du tube d'une matière grasse avant de le plonger dans l'eau, celle-ci s'abaisse d'abord en formant une légère convexité à la surface supérieure; elle s'élève ensuite au-dessus de son niveau, mais n'atteint jamais la hauteur qu'elle avait auparavant, et alors la surface supérieure devient concave, de convexe qu'elle était. Tels sont les phénomènes généraux qui caractérisent la capillarité.

Pendant longtemps on ne put donner une explication satisfaisante de ce phénomène. On supposa d'abord que l'air ne s'introduisant que difficilement et en petite quantité dans les tubes capillaires, exerçait sur la colonne liquide une pression moins forte que celle due à l'air extérieur, et que dès lors le liquide devait monter. On objecta à cette explication, que le phénomène ayant lieu dans le vide, on ne pouvait lui assigner cette cause; on répondit que le vide n'étant jamais parfait, la quantité d'air restant, n'exerçant pas la même pression à l'intérieur et à l'extérieur du tube, les phénomènes de capillarité devaient toujours avoir lieu. Descartes eut recours, sans succès, à ses tourbillons; mais dès l'instant que Newton eût démontré que l'attraction

pouvait s'exercer à de petites distances, on rapporta la capillarité à un effet de ce genre. Hawksbée posa en principe que lorsqu'un tube capillaire était plongé dans l'eau par une de ses extrémités, l'anneau de verre situé au même endroit agissant par des forces perpendiculaires sur la petite lame de liquide que l'immersion avait mise en contact avec son intérieur, rendait l'eau spécifiquement plus légère. La pression de cette lame sur les parties situées au-dessous d'elle se trouvant ainsi diminuée, celle du liquide environnant qui était devenue prépondérante poussait la lame d'eau dans l'intérieur de l'anneau suivant, et faisait entrer une nouvelle lame d'eau dans l'intérieur de l'anneau terminal; les deux anneaux exerçant des actions semblables à la première sur la portion du liquide voisin, la pression de l'eau fait monter une nouvelle couche, etc. D'autres hypothèses furent mises successivement en avant, mais sans aucun succès. Jurin, auquel on doit une suite d'expériences intéressantes sur la capillarité, est le premier qui en ait entrevu la cause; suivant lui, l'élévation de l'eau est due à l'attraction de l'anneau situé immédiatement au-dessus de la colonne que forme ce liquide. Voici l'expérience qui l'a conduit à adopter ce principe : si l'on soude bout à bout deux tubes capillaires, de diamètre différent, et qu'on les plonge dans un liquide, puis qu'on les retire peu à peu, on trouve que l'eau s'élève dans le système des deux tubes, à la même hauteur qu'elle aurait atteinte dans un tube de même diamètre que celui qui est soudé à la partie supérieure. Les théories qui suivirent celles de Jurin s'appuyèrent sur le même principe, pour démontrer le rapport inverse de l'élévation et des diamètres des tubes; mais comme elles ne pouvaient rendre compte de toutes les circonstances du phénomène, on fut obligé d'en venir à des abstractions qui ne tendaient rien moins qu'à enlever au phénomène sa généralité. Le seul moyen était de soumettre l'hypothèse au calcul, afin de voir si les déductions s'accordaient avec les faits observés. C'est ce que fit Clairaut; il prit en considération les forces qui paraissaient concourir à la production du phénomène, savoir, la pesanteur, l'attraction des molécules du tube sur celles du liquide, et les attractions du liquide sur lui-même. Il eut égard, en outre, à une circonstance négligée avant lui, à la courbure concave ou convexe du ménisque qui termine la colonne du liquide, suivant qu'il y a élévation ou abaissement dans le tube, ce dont Jurin avait signalé l'influence. La théorie de Clairaut, quoique conçue avec beaucoup de sagacité, ne put expliquer complétement les phénomènes capillaires, attendu qu'elle supposait un fait impossible, savoir, que l'attraction

de la paroi du tube sur le liquide s'exerce à des distances sensibles. A la vérité, elle fit voir qu'il existait une infinité de lois d'attraction que l'on pouvait admettre, et qui donnaient le rapport inverse entre l'élévation et le diamètre du tube. Mais Clairaut ne prit pas la meilleure de ces lois, et laissa le mérite de cette découverte à Laplace, qui posa en principe que l'action des parois s'exerçait à des distances infiniment petites. Laplace en tenant compte, comme Clairaut, de la forme du ménisque, a ramené la question à ses véritables données; de sorte qu'il a pu déduire de sa théorie, dont nous allons essayer de donner une idée, tous les phénomènes généraux des tubes capillaires.

Lorsqu'une masse liquide est en repos, sa surface est horizontale; le liquide exerce alors sur lui-même une action propre, indépendante de la pesanteur terrestre, et qui produirait une dépression dans cette masse, sans l'impénétrabilité du liquide. Si l'on suppose maintenant que cette surface, par une cause quelconque, devienne concave ou convexe, comme cela a lieu dans les effets capillaires, le calcul démontre que l'action propre du liquide sur lui-même est modifiée. Cette action est plus forte si la surface est convexe; et moindre, si elle est concave. Voici de quelle manière on peut envisager ces effets. Considérons d'abord une masse liquide, de forme rectangulaire, terminée supérieurement par un plan horizontal, et cherchons l'effet de l'attraction de cette masse, à des distances infiniment petites, sur une colonne très-déliée, située dans son intérieur, et dont la direction soit perpendiculaire au plan supérieur. Considérons dans cette colonne, à une distance de ce plan moindre que le rayon de la sphère d'activité du liquide, un point ou une molécule quelconque; menons idéalement au-dessous de cette molécule, un plan parallèle au plan supérieur, et qui se trouve à la même distance de la molécule que celle-ci du premier plan, il est bien évident que cette molécule sera également attirée en haut ou en bas par les deux petites masses de liquide de la colonne, comprises entre les deux plans; mais il n'en est pas de même de la partie de la petite colonne située au-dessous du plan idéal, et cela jusqu'à une distance du plan supérieur moindre que le rayon de la sphère d'activité du liquide. Le même raisonnement s'appliquera à toute autre molécule que celle que l'on a considérée d'abord, et qui se trouve à une distance du plan supérieur moindre que le rayon de la sphère d'activité.

Il résulte de ce qui précède, que toutes les molécules situées à une distance infiniment petite de la surface supérieure, étant attirées par celles inférieures, l'effet de cette attraction pourra être considéré

comme équivalent à une pression exercée sur la base du liquide, et perpendiculairement à ses côtés.

Supposons maintenant que la colonne idéale dont il a été question soit prolongée au-dessus du plan supérieur, et prenons dans cette colonne une molécule située également à une distance du plan supérieur moindre que le rayon de la sphère d'activité du liquide; il est bien certain que la masse liquide agira sur la molécule pour la faire descendre, et de là résultera nécessairement une augmentation de pression. Or, si on applique le même raisonnement que ci-dessus, et que l'on imagine un plan situé à la même distance de la molécule que le plan supérieur, on verra que la masse liquide, abstraction faite des effets de la pesanteur, tendra à faire descendre vers le bas, la colonne entière.

Voyons maintenant ce qui arrivera si la surface supérieure est convexe ou concave. Prenons-la d'abord convexe. Concevons un plan tangent au point le plus culminant de la surface convexe; il est évident que si l'on retranche l'action du ménisque compris entre le plan et la surface convexe de la masse liquide terminée par le plan tangent, on aura évidemment l'effet produit par la surface convexe. Prenons dans le ménisque une molécule située à une distance du point culminant moindre que le rayon de la sphère d'activité du liquide; menons une droite entre ces deux points, et prenons dans la colonne idéale une molécule qui soit à la même distance de la molécule du ménisque que celle-ci l'est du point culminant, la molécule du ménisque tendra à faire descendre en bas la molécule du point culminant, tandis que cette même molécule tendra à faire remonter vers le haut la molécule prise dans la colonne. Il est bien évident que cette action détruit la première, comme il est facile de s'en assurer en construisant le parallélogramme des forces.

Les trois molécules que nous avons prises forment un triangle isocèle, dont le sommet est la molécule du ménisque. Or, si l'on mène par ce point considéré comme sommet, sur la base, des lignes à égale distance des extrémités, en raisonnant comme ci-dessus, on verra que la molécule du ménisque est impuissante pour faire monter ou descendre les molécules placées tout le long de la base du petit triangle. Mais cette même molécule du ménisque exercera également, sur les points situés au-dessous de la molécule prise dans la colonne, jusqu'à une distance moindre que le rayon de la sphère d'activité du liquide, des actions qui tendront à faire remonter ces différents points; d'où il suit que l'action totale du ménisque tend à faire mouvoir cette

colonne de bas en haut. Or, on a vu précédemment que la masse liquide terminée par le plan tangent à la surface convexe a pour but de faire descendre cette colonne; il s'ensuit qu'en retranchant le ménisque qui tend à faire remonter la masse, celle-ci aura une plus grande tendance à redescendre, de sorte que l'action de la masse convexe est égale à l'action de la masse plane, plus à celle du ménisque convexe. Si, au lieu d'une surface convexe, on prend une surface concave, en se servant toujours du même plan tangent, il sera facile de prouver que l'action du ménisque a pour but de faire remonter la colonne; de sorte que l'action de la masse terminée par une surface concave, est égale à l'action de la masse plane, moins celle produite par l'action du ménisque.

Si l'on suppose maintenant que la corde qui mesure l'arc de la courbure reste constante, et que la courbure elle-même devienne de plus en plus sensible, on forme alors une plus grande partie de la circonférence, dont le rayon deviendra toujours plus petit. Il résulte de cet état de choses que le nombre des molécules contenues dans chacun des deux ménisques augmentera, et que l'action des ménisques augmentera de même : Laplace a démontré que cette action est en raison inverse du rayon de la surface sphérique. Voyons comment cette théorie s'applique à l'explication des phénomènes capillaires; nous aurons par là l'occasion de parler de faits dont on n'a pas fait mention.

Si dans un tube où s'opère l'action capillaire, l'on sépare par la pensée une colonne verticale infiniment déliée et assez éloignée des parois du tube pour que celui-ci n'ait aucune influence sur elle, et que dans la partie inférieure ce tube idéal prenne une direction horizontale, puis se redresse verticalement de manière à déboucher dans le liquide en dehors du tube, il est bien évident que, si la pression est la même à chacune des extrémités supérieures, l'eau se maintiendra de niveau dans les deux colonnes, tandis qu'elle s'élèvera ou s'abaissera dans une d'elles, selon que la pression sera plus grande ou moindre dans l'autre colonne; ce qui arrivera suivant que la surface supérieure de la colonne du tube capillaire sera concave ou convexe. Bien entendu que le liquide, en s'élevant dans le tube au-dessus de son niveau, compensera la différence de pression par l'augmentation de poids. Or, Laplace ayant trouvé par sa savante analyse que l'action du ménisque était en raison inverse du diamètre du tube, l'élévation du liquide au-dessus du même niveau, sera soumise au même rapport.

On a vu plus haut que l'abaissement du mercure n'avait lieu dans

les tubes capillaires qu'autant que leurs parois intérieures étaient recouvertes d'une couche d'humidité. Si donc l'on renferme du mercure parfaitement desséché dans un siphon dont l'une des branches soit capillaire, et dont l'autre ait un diamètre d'une certaine étendue, si l'on ferme à la lampe les deux extrémités après avoir purgé d'air les deux branches, dès l'instant que la partie convexe est tournée en bas, le mercure s'élève de plusieurs lignes dans la branche capillaire.

La théorie rend parfaitement compte de l'élévation de l'eau entre deux lames situées parallèlement l'une à l'autre à une très-petite distance ; la surface terminale forme dans ce cas une espèce de sillon semblable à une portion de cylindre creux ; la section de ce cylindre, suivant un plan perpendiculaire aux faces, est un arc de cercle qui est le même que dans un tube qui aurait pour diamètre l'écartement des deux lames. Or, si l'on conçoit au point le plus bas de la courbure du liquide intérieur un canal vertical replié de manière à ressortir à la surface du liquide extérieur, il est évident que le liquide s'élèvera entre les lames comme dans les tubes, en raison de l'action du ménisque. Laplace a démontré que l'action de ce ménisque est égale à la demi-somme des actions des ménisques formés par deux surfaces sphériques, dont l'une aurait pour rayon celui de la section qu'offre la figure, et l'autre celui de la section perpendiculaire à la précédente. Mais cette section étant une ligne droite dont le rayon est infini, le ménisque doit être nul, et il ne reste plus que la moitié de l'action du ménisque formé par la première sphère, tandis que, dans un tube capillaire dont le diamètre est égal à la distance entre les deux lames, l'élévation du liquide est représentée par l'action entière du ménisque. Le liquide doit donc s'élever une fois de moins entre les deux lames que dans le tube. Le même théorème démontre que, dans l'intervalle compris entre deux tubes concentriques, l'effet capillaire est semblable à celui produit entre deux plans parallèles; ces résultats de l'analyse sont confirmés par l'expérience.

Passons au cas où deux lames réunies par un de leurs bords comprennent entre elles un petit angle. L'expérience démontre que, dans ce cas, l'eau s'élève inégalement dans l'espace compris entre les deux plans, et d'autant plus que l'on considère des parties plus rapprochées de la ligne de jonction : les points extrêmes des colonnes liquides appartiennent à une hyperbole équilatère. Il est facile de démontrer qu'il doit en être ainsi. En effet, supposons que l'on fasse passer un plan par la ligne de jonction et le liquide intérieur, on

aura d'une part la courbe, qui aura pour axe des coordonnées la ligne de jonction, et pour axe des abscisses la ligne d'intersection de ce plan avec la partie inférieure du liquide. Or, on peut considérer l'eau comme un assemblage de petits cylindres qui auraient pour hauteur les perpendiculaires menées depuis l'axe des abscisses jusqu'à l'extrémité de la courbe, et qui auraient pour diamètre les distances correspondantes à l'axe des ordonnées. Or, d'après la loi à laquelle est soumise l'élévation dans les tubes capillaires, les hauteurs du liquide doivent être en raison inverse du diamètre des bases. Mais comme chaque hauteur est en raison inverse du diamètre de la base, et comme les diamètres sont proportionnels aux abscisses, il en résulte que les élévations sont en raison inverse des abscisses, ce qui est le caractère de l'hyperbole équilatère, qui a nécessairement pour asymptotes les deux axes précédemment mentionnés. Nous avons à montrer comment on peut, avec la théorie de Laplace, rendre compte du mouvement des liquides dans des tubes coniques ou entre des lames inclinées sous un petit angle. Prenons un tube conique ouvert par les deux extrémités, et plaçons-le de manière que son axe soit horizontal; si l'on fait couler dans l'intérieur une goutte d'eau ou d'huile d'orange, on voit aussitôt cette goutte se porter vers le haut. Concevons une petite colonne de liquide dans une position quelconque; les deux surfaces de cette colonne étant concaves, la courbure qui répond à un plus petit diamètre agit avec plus de force pour tirer la colonne vers le sommet, que la courbure qui correspond à un rayon plus grand pour tirer la même colonne vers la base. Par suite d'une différence d'action, la colonne devra se porter vers le haut avec une vitesse toujours croissante. On obtient un effet contraire avec le mercure, attendu que les surfaces extrêmes étant convexes, et celles de la base supérieure ayant la plus grande courbure, il en résultera une tendance plus forte de la colonne à s'avancer vers la base du tube qu'à se porter vers le sommet, et cela avec une vitesse qui ira toujours en diminuant. Si l'on incline plus ou moins le sommet du tube, on aura des effets dépendants de la capillarité et de la pesanteur.

La théorie explique aussi facilement les attractions et répulsions apparentes de deux petits corps qui flottent sur un liquide, et à peu de distance l'un de l'autre. Si l'on prend deux petites boules de cire qui ne peuvent être mouillées par l'eau à la surface de laquelle elles sont placées, et qu'on les approche l'une de l'autre à une petite distance, elles se réuniront. Les deux boules n'étant pas mouillées, dépri-

ment nécessairement l'eau autour d'elles, et dès lors, à l'extrémité de la concavité, le liquide commence à former une courbure légèrement convexe. Lorsque la distance entre les deux corps est assez grande, la partie de la surface comprise entre les deux convexités reste de niveau. Il en résulte que les pressions latérales que le liquide exerce de part et d'autre sur chaque globule étant égales, l'équilibre n'est point troublé; mais si la distance entre les deux globules continue à diminuer, il y a un instant où tout le liquide compris dans l'espace intermédiaire est abaissé; alors les pressions latérales deviennent prépondérantes, et poussent nécessairement les deux globules l'un vers l'autre.

Considérons maintenant deux corps arrondis, deux globules, dont l'un peut être mouillé et l'autre pas, tels que le liége et la cire, le liquide s'élèvera autour du premier, et s'abaissera autour du second. Si on les approche l'un de l'autre jusqu'à une petite distance, la pression qui agit latéralement sur la boule de liége du côté de l'intervalle qui les sépare, étant plus forte que celle qui a lieu dans la partie opposée, à cause de l'élévation du liquide entre l'intervalle et le globule de liége, le globule de cire sera obligé de reculer comme s'il était repoussé par l'autre. Enfin, si l'on considère deux corps susceptibles d'être mouillés, ils se porteront l'un sur l'autre, et finiront par s'unir; la théorie de Laplace rend compte également de cet effet; en diminuant la distance qui sépare les deux corps, il arrive un instant où l'eau est déprimée, et alors la pression latérale l'emportant, les deux corps se portent l'un sur l'autre.

Deux lames parallèles suspendues verticalement dans l'eau, mouillées ou non mouillées par celle-ci, s'attirent sensiblement quand on les rapproche assez pour que l'espace rectiligne qui les sépare disparaisse et que les courbures se croisent; elles se précipitent alors l'une sur l'autre, se joignent et se pressent; si l'une des lames seulement est mouillée, il y a répulsion. Ces effets rentrent dans la classe des phénomènes décrits précédemment.

Il est facile de démontrer pourquoi un tube capillaire moins long que la colonne de liquide qui s'élèverait dans son intérieur ne donne pas écoulement à ce liquide, d'où résulterait un mouvement perpétuel : dès l'instant que le liquide a atteint le haut du tube, la surface supérieure, de concave qu'elle était d'abord, devient convexe, laquelle exerçant sur le liquide une pression plus grande que la surface plane, arrête naturellement le mouvement ascensionnel.

Laplace, après avoir terminé la théorie des tubes capillaires,

invita M. Gay-Lussac à faire une série d'expériences dans le but de voir jusqu'à quel point les résultats de l'analyse seraient confirmés par ceux de l'expérience. Les élévations et les abaissements des liquides dans les tubes capillaires furent mesurés avec la précision des observations astronomiques. Les diamètres des tubes furent déterminés au moyen du poids de la colonne de mercure qu'on y avait introduite. Pour avoir des effets comparables, les tubes furent mouillés intérieurement par le liquide sur lequel on opérait; c'est faute d'avoir pris cette précaution que les physiciens qui se sont occupés de cette question sont arrivés à des résultats différents relativement à la hauteur d'un liquide dans des tubes capillaires. M. Gay-Lussac est le premier qui ait pris constamment cette précaution dans les expériences dont voici les résultats :

Dans un tube de verre blanc dont le diamètre intérieur était de $1^{mm},29441$, la hauteur de la colonne d'eau a été en moyenne de $23^{mm},1634$, la température étant de $8°,5$: si l'on ajoute à cette hauteur moyenne le sixième du diamètre du tube, on a $23^{mm},3791$. Dans un autre tube de $1^{mm},90381$ de diamètre, à la même température, l'élévation a été de $15^{mm},5861$, et en ajoutant le sixième du diamètre, on a $15^{mm},9034$. Ces deux résultats nous montrent que les élévations corrigées sont à très-peu près réciproques du diamètre des tubes. Suivant Laplace, la correction indiquée est nécessitée par l'adhérence du liquide sur la paroi du tube, laquelle s'oppose à ce que l'élévation atteigne son maximum.

M. Gay-Lussac a déterminé aussi l'élévation du point le plus bas de la surface de l'eau qui s'élève entre deux lames de verre, verticales et parallèles, très-rapprochées l'une de l'autre, et plongeant dans un liquide. Pour une distance de $1^{mm},069$, la moyenne de cinq expériences, peu différentes entre elles, a donné une hauteur moyenne égale à $13^{mm},574$. En opérant avec de l'alcool, il a trouvé que les élévations corrigées sont, dans divers tubes capillaires très-étroits, en raison inverse du diamètre des tubes ; et, par plusieurs expériences, que le poids d'une colonne d'eau, soulevée au moment où elle est prête à se détacher, était égal à $59^{gr.},40$. Pour détacher le même disque de verre de l'alcool, il fallait employer un poids égal à $31^{gr.},08$, à la même température, et l'alcool ayant une pesanteur spécifique de 0,81961 ; avec de l'alcool, ayant une densité égale à 0,8595, à la même température, l'élévation dans le premier tube, ayant égard à la correction, a été de $9^{mm},51649$, et le poids pour détacher le disque de la surface de l'alcool de $32^{gr.},87$. Avec de l'alcool à 0,94153, le liquide

s'est élevé dans le même tube à $9^{mm}99727$, et l'adhésion du disque a été égale à $37^{gr.},152$. En opérant avec de l'essence de térébenthine, dont la densité était de 0,869458, la hauteur de la colonne dans le premier tube a été de $10^{mm},16729$, avec la correction, et l'adhésion a été trouvée de $34^{gr.},104$. Les disques des diverses substances susceptibles d'être mouillées par le même liquide, opposent, à diamètres égaux, la même résistance à leur séparation de ce liquide; la résistance étant égale à l'adhésion du liquide sur lui-même. Ce résultat a été vérifié par M. Gay-Lussac, sur un disque de verre et un disque de cuivre. Quand le liquide mouille les disques, on ne peut avoir, par l'expérience, que la mesure de l'attraction du liquide sur lui-même; mais quand les disques ne sont pas parfaitement mouillés, le frottement exercé par le liquide contre la surface intérieure produit de grandes différences dans les résultats, comme on l'a reconnu en opérant avec des disques de verre et du mercure.

Revenons à la théorie de Laplace, publiée en 1806 et 1807, pour mieux indiquer les modifications qu'on a cru devoir y apporter. Cet illustre mathématicien avait montré que l'on devait considérer l'action des molécules du tube sur celles du liquide, et l'action mutuelle des molécules du liquide décroissant très-rapidement, comme suivant une loi inconnue depuis le contact jusqu'à une distance insensible où elles disparaissaient entièrement, et que ces forces suivaient la raison inverse du carré de la distance. C'est ainsi qu'il parvint à obtenir *l'équation* de la surface dans son état d'équilibre.

Th. Young avait reconnu l'invariabilité de l'angle sous lequel la surface capillaire vient couper celle du tube, et le rapport qui existe entre l'élévation du liquide dans un tube de très-petit diamètre, et son adhésion à un disque formé de la même matière que le tube; il éleva contre la théorie de Laplace plusieurs objections, dont deux ont été prises en considération par les mathématiciens. L'une est que Laplace n'avait pas tenu compte de l'action de la chaleur dans le calcul des forces moléculaires, et l'autre, tirée de l'expérience, qui se rapporte au cas de plusieurs liquides superposés dans un même tube. Pour tenir compte de la répulsion calorifique, Poisson dit qu'il suffit de prendre, pour l'action mutuelle de deux molécules, l'excès de l'attraction de leur matière pondérable sur la répulsion de leur quantité de chaleur, et de considérer, par conséquent, la fonction qui l'exprime comme une quantité qui peut changer de signe dans l'étendue de ses valeurs sensibles.

Laplace avait omis dans ses calculs une circonstance physique im-

portante, la variation rapide de densité que le liquide éprouve près de sa surface libre et près de la paroi du tube, et sans laquelle les phénomènes capillaires ne sauraient avoir lieu. A cet égard, Poisson s'exprime de la manière suivante :

« Dans l'état d'équilibre, chaque couche infiniment mince d'un « liquide est comprimée également sur ses deux faces par l'ac- « tion répulsive des molécules voisines, diminuée de leur force attrac- « tive, ou, ce qui est la même chose, on peut la considérer comme « appuyée sur la partie du liquide située d'un côté, et comprimée « par la partie située du côté opposé ; et son degré de condensation est « déterminé par la grandeur de sa force comprimante. A une distance « sensible de la superficie du liquide, cette force provient d'une couche « du liquide adjacente à la couche infiniment mince, dont l'épaisseur « est complète, et partout la même, c'est-à-dire, égale au rayon d'acti- « vité des molécules fluides; et, pour cette raison, la densité intérieure « du liquide est aussi constante, abstraction faite de la petite conden- « sation due à la pesanteur, qui varie avec la distance à la surface « supérieure ; mais quand cette distance est moindre que le rayon « d'activité moléculaire, l'épaisseur de la couche située au-dessus de « celle que l'on considère est aussi plus petite que ce rayon. La force « comprimante qui provient de cette couche supérieure, décroît alors « très-rapidement avec la distance à la surface, et s'évanouit entière- « ment à la surface même ou la couche, infiniment mince, n'est plus « comprimée que par la pression atmosphérique. Par conséquent, la « condensation du liquide décroît de même, suivant une loi inconnue, « à mesure que l'on s'approche de sa surface libre, et sa densité est « très-différente à cette surface et à une profondeur qui excède un « tant soit peu le rayon d'activité de ses molécules, ce qui suffit pour « qu'elle soit égale à la densité intérieure du liquide. »

Poisson démontra qu'en négligeant cette variation rapide de la densité dans l'épaisseur de la couche superficielle, la surface capillaire demeurait plane et horizontale. Il démontra la nécessité d'avoir égard à la compression variable que le liquide éprouve près de la paroi du tube, et qui s'étend jusqu'à la limite de l'action exercée par ce corps solide. En ayant égard à ces données, il a donné l'équation commune à tous les points de la surface de contact de deux liquides superposés, et contenus dans un tube quelconque, et l'équation particulière aux points de son contour, ce qui comprend, comme cas particulier, les équations relatives à la surface libre d'un seul liquide. Il a appliqué ensuite ces équations générales

à l'équilibre des liquides, dans les tubes d'un très-petit diamètre.

De la capillarité dans les gaz.

M. Dobereiner a découvert que le gaz hydrogène, renfermé dans des vases de verre fêlé et sur l'eau, s'échappe du vase par la fente, et permet ainsi à l'eau de monter dans le vase. La hauteur de celle-ci est souvent de huit centimètres au-dessus du niveau extérieur. Il a attribué ce phénomène à une action capillaire des deux surfaces séparées du verre; mais, comme le gaz hydrogène est le seul qui jouisse de cette propriété, il a admis qu'elle provenait de ce que les molécules du gaz hydrogène avaient de plus petites dimensions que les molécules des autres gaz, en même temps qu'elles étaient plus distendues par l'action de la chaleur.

M. Magnus avait pensé que le gaz oxygène de l'air ambiant, pénétrant en même temps que le gaz hydrogène, et ces deux gaz se condensant dans la fente, par l'effet de la capillarité, donnaient naissance à de l'eau qui s'évaporait, et que ce phénomène, étant incessant, les effets se passaient comme si l'hydrogène s'échappait par la fente. Pour vérifier jusqu'à quel point cette assertion était fondée, M. Magnus a pris un vase de verre fendu rempli de gaz hydrogène, et fermé sur le mercure. Ce vase fut entouré d'une autre cloche de verre plongeant également dans le même bain de mercure. Le niveau du vase intérieur était plus élevé que le niveau du vase extérieur, afin d'observer plus facilement la différence de niveau. Dans le cas de formation d'eau, le volume de l'hydrogène aurait diminué en même temps que le volume de l'air atmosphérique de la couche enveloppante. L'expérience a montré que le mercure s'est élevé dans le vase intérieur, tandis que celui de la cloche extérieure s'est abaissé dans le même rapport que l'autre s'est élevé; ce qui démontre évidemment que le gaz hydrogène s'est échappé par la fente sans l'intermédiaire de l'oxygène. L'expérience de M. Dobereiner a été répétée d'une autre manière inverse : le vase intérieur a été rempli d'air atmosphérique, et le vase extérieur rempli d'hydrogène. On a trouvé des effets analogues aux précédents. Le vase intérieur fut rempli d'hydrogène, la cloche le fut avec du gaz acide carbonique ; les effets furent les mêmes qu'avec l'air atmosphérique. Or, comme il n'y a aucune action entre l'hydrogène et le gaz acide carbonique, il faut en conclure que l'affinité n'entre pour rien dans la production du phénomène. M. Magnus a cherché à l'expliquer, en l'attribuant à une espèce d'évaporation; mais nous nous en tenons à l'action capillaire qui ne saurait être mise en doute.

Les phénomènes capillaires seront étudiés ultérieurement dans leurs rapports avec les phénomènes d'endosmose et d'exosmose, dont il n'est pas fait mention ici, attendu qu'ils seront l'objet d'un chapitre spécial dans lequel ils seront exposés avec tous les développements qu'exige leur importance quand nous traiterons de l'ascension de la séve dans les végétaux, et en général de la circulation des liquides dans des vaisseaux séparés par des diaphragmes.

CHAPITRE X.

DE L'ACOUSTIQUE.

Des sons, de leur mesure, de leur propagation, de leur vitesse et de leur intensité.

Jadis, l'acoustique ne s'occupait que des sons ou des vibrations perceptibles à l'ouïe; mais aujourd'hui cette branche de la physique s'est considérablement agrandie, puisqu'on y comprend encore l'étude des vibrations résultant des propriétés moléculaires des corps, indépendamment de la sensation qu'elles produisent sur l'ouïe. C'est particulièrement cette dernière partie de l'acoustique qui doit nous intéresser, attendu qu'elle nous fournit des principes que nous invoquerons pour étudier la constitution moléculaire des corps.

Les anciens, comme nous l'avons déjà dit, possédaient quelques notions sur la manière dont le son se propage dans l'air; Pythagore et Aristote savaient, par exemple, que le son est transmis à nos oreilles par l'intermédiaire de l'air. Ils avaient aussi des notions sur la nature de l'harmonie. Pythagore avait fait une expérience intéressante sur les rapports des sons. On trouve dans Vitruve divers passages qui prouvent que l'on connaissait ce qui a rapport aux ondes sonores, au renforcement et à la réflexion du son. Néanmoins, l'acoustique n'existait pas comme science, avant que Bacon, Galilée, le P. Marsenne et Wallis se fussent occupés de la recherche des lois des phénomènes qui constituent cette partie de la physique.

Newton est le premier qui ait cherché à soumettre à l'analyse mathématique la propagation du son à travers l'air. Ce grand homme supposa que l'air était un corps éminemment élastique, et que l'effet d'un choc quelconque était de le condenser dans le sens de ce choc; la

partie frappée, réagissant à son tour, refoulait la partie qui l'avait déplacée, et chassait en même temps celle qui était à sa partie opposée; de sorte que chaque molécule avançait et reculait tour à tour. Il a introduit cependant dans sa théorie des erreurs qui ont été signalées par Crammer, et corrigées par Euler et Lagrange.

Les sons sont produits par des vibrations ou ébranlements successifs plus ou moins prolongés : ces vibrations se communiquent à tous les corps avec lesquels le corps ébranlé est en contact, ainsi qu'à l'air qui sert d'intermédiaire pour arriver jusqu'à l'organe de l'ouïe.

La sensation du son dépend donc des mouvements communiqués à la membrane du tympan par l'intermédiaire de l'air ou des fluides dans lesquels elle est plongée. Savart a démontré ce fait, qui était admis depuis longtemps *à priori*, en faisant voir que les figures produites par le sable sur les grandes membranes avaient également lieu sur celles d'un petit diamètre. Les sons étant plus ou moins aigus, selon que le nombre des vibrations est plus ou moins rapide, il était donc indispensable d'avoir des moyens exacts pour mesurer le nombre de vibrations qui produisent un son.

Le P. Marsenne avait fixé ce nombre d'après la loi de la longueur des cordes, laquelle donne un nombre de vibrations en raison inverse de cette longueur; ce procédé présente des causes d'erreur. La corde, en oscillant, prend un mouvement gyratoire qui modifie ses oscillations; en raccourcissant une corde, le son monte toujours plus qu'il ne convient, attendu que la flexibilité, supposée parfaite par les mathématiciens, n'existe pas, et que la rigidité d'une corde, même très-fine, se fait sentir à mesure que cette corde devient plus courte; enfin, les proportions de matières qui composent l'instrument destiné à ce genre d'expériences, viennent encore troubler ce résultat par l'influence que la réaction des vibrations communiquées exerce sur celles de la corde.

Chladni avait adopté, pour déterminer un son dont le nombre des vibrations est connu, la loi des verges, dans lesquelles le nombre des oscillations augmente en raison inverse de la racine carrée de leur longueur; mais cette évaluation n'est pas exacte.

Prony a pris pour base la loi de la tension par des poids : ce procédé a été également repoussé, attendu qu'un fil tendu par un poids ne reste pas de la même longueur, et continue très-longtemps à s'allonger, surtout quand on emploie des poids très-forts.

M. Cagniard Latour a employé sa sirène, instrument très-propre à la mesure des sons, mais qui n'était complet qu'autant qu'on pou-

vait le faire fonctionner au moyen d'un jet d'air continu et régulier. Cette seconde partie du problème a été résolue avec le dépenseur de M. Bocquillon. La sirène est généralement adoptée aujourd'hui par tous les physiciens.

M. Savart a fait usage d'un appareil à quatre roues dentées, dont l'une contient deux cents dents, la seconde deux cent cinquante, la troisième trois cents, et la quatrième quatre cents, ce qui produit la sensation d'un ton de sa tierce, de sa quinte et de l'octave, quand on choque ces dents avec un corps quelconque, tandis qu'elles sont animées toutes d'un même mouvement de rotation. On a fait quelques reproches à cet appareil, parce qu'il est presque impossible d'avoir un mode rotatoire sans variations. C'est pour ce motif que Savart se servait de préférence, pour déterminer le nombre de vibrations, des cordes d'un violon ou d'une basse. Tartini, au moyen de ses battements, a donné un procédé à l'aide duquel on peut aussi déterminer le nombre de vibrations d'un son. Tels sont les différents moyens qui servent à évaluer le nombre de vibrations qui composent les sons ; passons aux différentes causes qui les produisent.

Lorsque l'air se précipite subitement dans une cavité, par suite d'une différence de pression, il y est instantanément condensé par suite de la vitesse acquise, et son élasticité le faisant réagir, il en résulte des ondes alternativement dilatées et condensées qui, en se propageant jusqu'à notre oreille, y déterminent une impression dépendante de la vitesse de ces ondes. Le crève-vessie et le pistolet de Volta produisent des ondes de ce genre.

Le son peut être également produit par des alternatives successives du passage et de l'interruption de l'air, de l'eau, etc., comme la sirène fonctionnant dans l'air et dans l'eau, nous en fournit un exemple, et comme le moulinet qui ouvre et ferme l'orifice d'une fontaine de compression en est un autre. Viennent ensuite comme instruments propres à produire les sons, outre les cordes, les anches libres, l'appareil de Labarre, la sirène de Hachette, la glotte en acier, en caoutchouc de M. Cagniard. On a fait des recherches assez étendues sur les sons les plus graves et les plus aigus que l'oreille puisse percevoir. Le son le plus grave employé en musique est produit par trente-deux vibrations ; mais cette limite peut être beaucoup plus reculée, car on peut avoir des sons soutenus de douze vibrations par seconde, en produisant des chocs plus forts, afin que la durée de chacun des coups agisse sur l'organe jusqu'à l'instant où se fait entendre le coup suivant. Quant à la limite des sons aigus, elle n'a pas encore été déterminée positivement.

Wollaston a avancé que des sons très-aigus, comme le cri de la chauve-souris, n'étaient pas appréciables par certaines oreilles, et qu'au delà de trente-deux mille vibrations, on cessait d'entendre les sons que plusieurs animaux distinguent cependant très-bien. Savart est allé au delà de cette limite au moyen de son appareil à roues dentées, puisqu'il est parvenu à apprécier des sons de trente-deux mille vibrations, et même de quarante-huit mille.

Jadis, on ne faisait nullement attention au son appelé *bruit*, parce qu'on supposait qu'il n'avait aucun rapport avec les sons musicaux; mais ce bruit, qui est toujours composé de plusieurs sons, peut être apprécié par l'oreille, surtout lorsque l'on compare ensemble plusieurs bruits de même espèce.

Il suffit à l'organe de l'ouïe qu'un son résulte d'un très-petit nombre de chocs ou d'alternatives de compressions et de dilatations. Deux de ces chocs, produits dans un temps très-court, déterminent un son appréciable. Il est bien établi maintenant que le bruit est le produit de vibrations semblables à celles qui constituent des sons musicaux; la seule différence qui existe se trouve dans le peu de durée des vibrations ou dans le mélange confus d'un grand nombre de sons.

I. *De la propagation et de la vitesse du son.*

Il n'est pas encore complétement démontré, quoique cela soit probable, que la propagation et la vitesse soient les mêmes pour les sons graves que pour les sons aigus. Mairan a cru observer, dans une expérience faite avec des cloches, que le son aigu arrivait plus vite que le son grave; mais, d'un autre côté, on a remarqué depuis longtemps, que lorsque l'on écoute un concert à de grandes distances, on entend en même temps et la mesure et la même harmonie, c'est-à-dire, tous les accords, ce qui ne peut avoir lieu qu'en admettant que tous les sons aient la même vitesse.

On peut citer, parmi les physiciens qui se sont occupés de déterminer la vitesse du son: en France, le P. Marsenne, Cassini, Huyghens; les membres de l'Académie des sciences, en 1738, et les membres du bureau des longitudes, en 1822; en Angleterre, Walker, en 1698, Flamsteadt, Halley et Derham, en 1704; en Italie, les membres de l'Académie del Cimento, en 1660, et Bianconi, en 1440; en Allemagne, Meyer, en 1778, Muller, en 1791, et Bensenberg, en 1809; dans les Pays-Bas, Mohl, van Beck, en 1823; en Amérique, la Condamine, en 1740, et Espinosa de Banza, en 1794.

Les résultats obtenus par tous ces physiciens présentent des différences assez remarquables.

En 1738, les membres de l'Académie des sciences déterminèrent la vitesse du son entre Montlhéry et Montmartre, distants l'un de l'autre de 29,000 mètres ; le signal était donné par des coups de canon, et des observateurs placés à différentes distances sur la même ligne droite marquaient le temps écoulé depuis l'apparition de la lumière jusqu'à l'arrivée du son. On déduisit de ces expériences les résultats suivants : 1° la vitesse du son est uniforme, c'est-à-dire, qu'en général l'espace parcouru est proportionnel an temps ; 2° la vitesse est la même, que le temps soit couvert ou serein, clair ou brumeux, que la pression atmosphérique soit grande ou petite, pourvu que l'air soit tranquille ; mais que, si l'air était agité par le vent, la vitesse du vent, décomposée suivant la direction de la ligne sonore, augmentait ou diminuait de toute sa valeur la vitesse du son ; 3° la vitesse du son à la température de 6° est de $337^m,18$ par seconde.

Les expériences faites à Paris en 1822 par le bureau des longitudes admettent que la vitesse du son est de $340^m,88$ par seconde à la température de 16° centigrades. Ces expériences ont été faites également avec des pièces de canon placées à Montlhéry et à Villejuif. Toutefois, les avis sont partagés sur l'emploi du canon pour mesurer la vitesse du son. Quelques physiciens pensent que l'explosion peut troubler les vibrations.

Nous avons dit précédemment que Newton avait donné l'expression analytique de la vitesse du son ; mais cette expression ne donnait que les $\frac{5}{6}$ de la vitesse obtenue par l'expérience. Laplace a expliqué cette différence en admettant que le son ne peut se propager dans un milieu quelconque sans comprimer les molécules de ce milieu, et sans produire par conséquent un dégagement de chaleur. Cette chaleur, dégagée, modifie la loi de l'élasticité et accélère la propagation du son. A la température de 10°, la vitesse du son, déterminée par la théorie, est de 337,21, tandis que l'expérience donne 340,88. Laplace a calculé aussi la vitesse du son dans les liquides et dans les solides, comme on le verra ci-après.

L'intensité du son doit diminuer en raison de la distance au centre d'ébranlement ; car si la masse sonore croît avec une grande rapidité à mesure qu'elle s'éloigne de ce centre, l'amplitude des vibrations des molécules de l'air doit diminuer en même temps. Pour des distances très-grandes, on démontre par le calcul que les vitesses des molécules de l'air, situées sur un même rayon sonore, sont en raison

inverse des distances au centre d'ébranlement; d'où il résulte que l'intensité du son sur le même rayon décroît proportionnellement au carré de la distance. Dans le cas où le mode d'ébranlement du corps sonore n'est pas le même dans tous les sens, il est bien évident que l'intensité du son n'est pas la même pour tous les points à égale distance du corps.

Delaroche, qui a cherché comment le vent modifiait les lois de la propagation du son, a obtenu les résultats suivants : 1° le vent n'a point d'influence sensible sur les sons entendus à grande distance; 2° à une grande distance, le son s'entend moins bien dans une direction contraire à celle du vent que dans la direction même du vent; la différence augmente avec la distance; 3° la loi de décroissement de l'intensité du son est moins rapide dans la direction du vent qu'en sens contraire; 4° ce décroissement est moins rapide perpendiculairement à la direction du vent que dans sa direction.

L'intensité du son varie en même temps que la densité de l'air dans le lieu où il a pris naissance. Le calcul démontre, en outre, qu'à température constante, l'intensité du son dans un lieu ne dépend que de la distance qu'il a parcourue et de la densité de la couche d'air d'où il est parti.

On a observé depuis longtemps, et M. de Humboldt a vérifié ce fait, que le son augmente d'intensité la nuit; que l'accroissement est plus grand dans les plaines que sur les plateaux élevés, sur les continents qu'en pleine mer. Bien des causes peuvent intervenir dans la production de ce phénomène, entre autres l'absence pendant la nuit de mille bruits divers et confus qui agitent l'air dans le jour.

De la réflexion des ondes sonores.

Toutes les fois que les ondes sonores passent d'un milieu dans un autre, elles éprouvent une réflexion partielle ou totale, selon que ce milieu laisse passer une partie de l'air ou lui oppose un obstacle fixe; telle est l'origine des échos. La loi de ce phénomène est la même que celle qui régit la réflexion de la lumière.

L'expérience a prouvé qu'il n'est pas nécessaire que la surface réfléchissante soit dure et polie. Ainsi, sur mer, les nuages forment quelquefois écho, ainsi que les voiles d'un bâtiment éloigné.

Les ondes sonores sont également réfléchies dans une atmosphère sans nuages lorsque toutes les parties ne sont pas également échauffées. Dans ce cas il se forme une foule de courants chauds ascendants et de courants froids descendants qui, n'ayant pas l'un et

l'autre la même densité, sont dans les conditions voulues pour produire des échos. Il résulte effectivement de là une foule de réflexions partielles qui diminuent sensiblement l'intensité du son.

M. de Humboldt rapporte à cette cause la différence que l'on observe dans le mode de propagation du son pendant le jour et pendant la nuit. Le son, en se réfléchissant sur les montagnes et les édifices, produit les échos; il se reproduit à l'oreille autant de fois qu'il est réfléchi.

Toutes les fois que le son vient frapper un plan, un édifice, le son réfléchi est le même en direction et en intensité que si l'ébranlement avait lieu derrière le plan à une distance égale à celle du véritable ébranlement primitif en avant du plan. Quand la surface réfléchissante a une forme quelconque, le calcul seul peut déterminer la figure et la vitesse de l'onde réfléchie. Poisson a résolu cette question dans différents cas, mais nous ne pouvons rapporter ici les résultats auxquels il est parvenu.

M. N. Savart a fait des observations intéressantes touchant la réflexion des ondes sonores, desquelles il résulte que lorsque ces ondes sont réfléchies suivant un axe dirigé vers leur point de départ, il se forme le long de cet axe, par la rencontre des ondes directes et des ondes réfléchies, un système d'ondes qui semblent privées du mouvement de transport. L'oreille parcourant les divers points de cette droite trouve des nœuds et des ventres, et des points intermédiaires où l'intensité du son augmente à mesure que l'on s'approche davantage d'un ventre. En déterminant la position sur l'axe des points immobiles, on trouve que la longueur des ondes fixes est égale à celle des ondes directes. Néanmoins, la première onde, celle qui est formée près de la partie réfléchissante, est plus petite que toutes les autres. Il existe autant de ces systèmes d'ondes que le corps a de sons harmoniques. Ces interférences n'ont lieu que pour les ondes de même longueur. On observe des effets semblables pour tous les sons simultanés qui composent un bruit. M. N. Savart a tiré de ces faits un moyen d'analyser un son, et de reconnaître le plus ou moins de pureté dont il jouit. Ce moyen d'analyse s'applique également au bruit. Ce n'est pas tout encore. Les surfaces planes jouissant de la propriété de renforcer un son quelconque, et cela suivant la distance du corps à la surface en raison du degré d'acuité du son, il s'ensuit que, si l'on approche progressivement d'une surface plane un corps en vibration, chacun des sons qui concourent à la formation du bruit sera entendu séparément.

Perception et comparaison des sons.

On a vu précédemment que quatre roues dentées ayant le même axe, portant 200, 250, 300 et 400 dents, et auxquelles on imprime un mouvement de rotation, donnaient, quand elles étaient choquées en même temps, la sensation de l'accord parfait qu'on désigne ainsi : ut, mi, sol, ut ; la tonique, la tierce, la quinte et l'octave. Mais si, au lieu de ces quatre roues, on en prend huit dont le rapport des dents soit celui des nombres suivants :

$$1 \ \frac{9}{8} \ \frac{5}{4} \ \frac{4}{3} \ \frac{3}{2} \ \frac{5}{3} \ \frac{15}{8} \ 2$$

on a les huit sons principaux de la gamme, ut, ré, mi, fa, sol, la, si, ut. En divisant une corde suivant les nombres $1 \ \frac{8}{9} \ \frac{4}{5} \ \frac{3}{4} \ \frac{2}{3} \ \frac{3}{5} \ \frac{8}{15} \ \frac{1}{2}$, on a les mêmes sons, attendu que les nombres de vibrations de la corde sont en raison inverse de sa longueur. Telle est la gamme naturelle. Si on voulait la commencer par une autre note que ut, il faudrait que les intervalles successifs fussent, comme dans la précédente, d'abord de deux tons, puis d'un demi-ton, de trois et enfin d'un demi-ton ; il faut pour cela intercaler entre les sons de la gamme naturelle des sons intermédiaires, qui n'en diffèrent que d'un demi-ton. On a appelé dièse la note supérieure du demi-ton, et bémol la note inférieure. Néanmoins, on a beaucoup discuté pour savoir comment on avait adopté ces nombres, et s'ils répondaient exactement à l'exigence de l'oreille. Tout ce que l'on sait, c'est que cette suite de sons flatte agréablement cet organe, même quand il est rebelle à la musique.

Les dièses et les bémols ne sont pas comptés de la même manière par les musiciens et par les physiciens; pour ceux-ci, une note bémolisée a un nombre de vibrations dans le rapport de $\frac{24}{25}$ du ton naturel ; elle est diésée, quand le nombre des vibrations est $\frac{25}{24}$ du même ton. Ainsi tandis que l'ut, par exemple, fait 24 vibrations, l'ut dièse en fait 25, et tandis que le si fait 25 vibrations, le si bémol n'en fait que 24. Les musiciens font, au contraire, les dièses et les bémols plus grands, de sorte que le nombre de vibrations qui produit une note bémolisée est moindre que celui du dièse de la note précédente; ainsi ré bémol est plus grave que ut dièse.

Les notions relatives à la formation de la gamme, et aux dièses et aux bémols, sont indispensables pour pouvoir déterminer le nombre de vibrations d'un son quelconque, au moyen d'une basse ou d'un violon, qui sont les instruments les plus convenables pour faire sûrement et promptement ces sortes d'appréciations.

Une remarque que nous ne devons pas oublier de rappeler, c'est que les rapports qui expriment les nombres de vibrations des sons d'une gamme, et, en général, le rapport des nombres de vibrations qui expriment des sons non discordants à notre oreille, sont des rapports simples. Cette loi est une loi générale de la nature; ainsi, par exemple, le rapport de la note fondamentale à l'octave, rapport que l'oreille saisit plus facilement, est de 1 à 2.

Newton a trouvé, dans ses expériences sur les anneaux colorés, que les épaisseurs d'un même anneau correspondant aux diverses couleurs du spectre, sont entre elles comme les racines cubiques des nombres $1\ \frac{8}{9}\ \frac{5}{6}\ \frac{3}{4}\ \frac{2}{3}\ \frac{3}{5}\ \frac{9}{16}\ \frac{1}{2}$. Il est remarquable que ces nombres expriment aussi les longueurs des cordes qui rendraient une gamme mineure, si elles étaient tendues par un même poids, excepté que $\frac{5}{6}$ est remplacé par $\frac{4}{5}$ et $\frac{9}{16}$ par $\frac{8}{15}$. La différence de ces fractions est très-petite, puisque celle des deux premières est de $\frac{1}{30}$ et la seconde est plus petite encore.

Nous nous abstenons d'entrer dans d'autres détails sur ce qui concerne la gamme, attendu que nous nous écarterions de la route que nous nous sommes tracée.

Vibrations des colonnes d'air renfermées dans les tuyaux.

On a le plus grand intérêt à connaître ce qui se passe dans les colonnes d'air qui vibrent, pour la théorie des instruments à vent. La question est plus facile que pour les corps solides, en raison de la possibilité de pénétrer dans le fluide ou le gaz qui est en mouvement, tandis qu'on ne peut juger de ce qui se passe dans les solides que par ce qu'on observe à leur surface. On démontre que c'est l'air qui vibre dans les tuyaux, en plaçant successivement plusieurs tubes de diverses substances, mais de même forme, sur une même embouchure; car le son est toujours le même. Néanmoins, la résistance des parois a une influence considérable; car, si l'on fait résonner des tuyaux dont les dimensions intérieures soient les mêmes, mais dont l'épaisseur diffère, par exemple, un tuyau de bois, un tuyau de carton, une feuille de papier, on trouve une grande différence dans les sons.

Il existe plusieurs moyens d'exciter des vibrations dans un tuyau; mais tous ont ceci de commun qu'ils produisent des agitations périodiques de l'air à l'embouchure du tube; celui dont on se sert ordinairement est l'embouchure des tuyaux d'orgue, lequel consiste en un jet d'air lancé contre un biseau. La vitesse du jet d'air peut pro-

duire, dans cette circonstance, les sons de la gamme, et comme la colonne d'air du tuyau ne peut produire qu'une certaine série de sons, il faut proportionner la vitesse du courant d'air au son que l'on veut produire. Si l'on veut obtenir, par exemple, le son fondamental d'un tuyau, c'est-à-dire, le son le plus grave qu'il puisse rendre, il faut employer une certaine vitesse qui, si elle est moindre, ne produit pas de son appréciable, tandis que si elle est plus grande, elle rend l'octave.

Si l'on fait produire un son à un tuyau, et qu'ensuite, après en avoir détaché l'embouchure, on souffle avec la même vitesse, l'embouchure seule produit le même son, mais beaucoup plus faible, de sorte que le tuyau n'est réellement qu'une cause de renforcement.

Si l'on forme une embouchure analogue composée d'un tranchant et d'un porte-vent formé par un tube de cuivre aplati à l'un de ses bouts, on pourra faire résonner tous les vases de forme quelconque, sphères, cubes, tuyaux ouverts, fermés, cylindriques, circulaires, etc. La direction de l'embouchure est indifférente, qu'elle soit dans le seus de la longueur ou de la largeur du tube. L'air, ébranlé par tout autre moyen, peut également faire résonner un tuyau, pourvu que les vibrations concordent avec celles que le tuyau peut produire. En soufflant dans un tuyau, on entend le son qui lui convient; dans ce cas, le mode d'ébranlement est analogue à celui de l'embouchure, puisque l'air vient se briser sur le bord du tuyau. Une plaque, une verge en vibration, placées à l'extrémité d'un tube, peuvent le faire résonner. La forme des embouchures de tous les instruments à vent est très-variable, mais elle a toujours pour but de donner un accès périodique à l'air. Dans les unes, ce sont les lèvres elles-mêmes qui vibrent; dans d'autres, ce sont des languettes élastiques de métal, de roseau, etc. La substance et la forme ont seulement de l'influence sur le timbre du son.

On peut produire le son dans des tubes par des moyens dont le mode d'action n'est pas suffisamment démontré, mais qui doivent s'expliquer par la sortie périodique d'un gaz ou par la rentrée et la sortie successive, ou par une agitation quelconque de l'air à l'orifice.

De petits tubes de six à huit centimètres de longueur, portant une petite boule dans laquelle on a introduit une tres-petite quantité de liquide, font entendre un très-beau son, lorsqu'on chauffe la boule jusqu'a produire l'ébullition de l'eau.

La flamme d'un courant d'hydrogène fait résonner un tube, quand on l'y fait entrer jusqu'à la hauteur convenable, pour que la longueur

de la partie qui résonne soit proportionnelle à la vitesse de la combustion de l'hydrogène.

De toutes ces expériences, concluons qu'il faut un écoulement périodique de l'air pour produire des sons. En étudiant ce qui se passe dans l'écoulement des liquides, on voit quelle est la cause de cette périodicité. Passons aux lois de la vibration de l'air dans les tuyaux.

D. Bernouilli a démontré quelles sont les vibrations de l'air lorsque les tuyaux sont cylindriques, d'une grande longueur par rapport à leur diamètre, et qu'ils sont ébranlés à plein orifice, c'est-à-dire, lorsque les vibrations sont communiquées par celles d'une plaque métallique dirigée perpendiculairement à l'axe. Dans le cas où les tuyaux sont fermés par un bout, un même tuyau peut produire les sons correspondants à des nombres de vibrations représentées par la suite des nombres impairs 1, 3, 5, 7, etc.; les sons de même ordre rendus par différents tuyaux correspondent à des nombres de vibrations, en raison inverse de la longueur des tuyaux; les sons rendus par un même tuyau résultent de la division de la colonne d'air, en parties égales, qui vibrent séparément et à l'unisson; l'orifice libre est toujours le milieu d'une partie vibrante; la longueur d'une partie vibrante est égale à la longueur de l'onde correspondant au son produit. Quand les tuyaux sont ouverts par les deux bouts, les sons rendus par un même tuyau sont représentés par la suite des nombres naturels 1, 2, 3, 4, 5, 6; les lois précédentes sont les mêmes, et les deux extrémités des tuyaux sont des tranches vibrantes. On a nommé *nœuds* les surfaces de séparation des tranches vibrantes, et qui sont composées de particules en repos; les ventres sont les milieux des tranches vibrantes. Si l'ébranlement, au lieu d'être à plein orifice, s'opère avec une anche ou une embouchure de flûte, les sons sont plus graves que ceux indiqués par les lois qui, du reste, ont été vérifiées par l'expérience.

Nous avons précédemment indiqué comment on déterminait la vitesse du son dans différents gaz; mais on y parvient encore par la résonnance des tuyaux. Dulong, qui s'est occupé de cette question, ayant trouvé que dans un même tuyau, où l'on faisait résonner différents gaz, dans les mêmes circonstances, les lignes nodales occupaient toujours les mêmes points, il en résultait que les nombres des vibrations des sons rendus par le même tuyau avec différents gaz, étaient proportionnels aux vitesses de propagation du son dans ces divers fluides; connaissant la vitesse du son dans l'air, on pouvait facilement calculer celle du son dans les autres gaz.

Vibration des veines fluides.

L'écoulement des liquides par des orifices circulaires en minces parois donne naissance à des colonnes en vibration. Savart a fait une étude toute spéciale de tous les phénomènes qui s'y rapportent, et les résultats qu'il a obtenus sont de nature à éclairer divers points de l'hydro-dynamique.

Une veine liquide se compose, comme on sait, d'une partie limpide, fixe et continue, et ensuite d'une partie trouble qui offre des renflements séparés par des nœuds ou étranglements également espacés. Cette partie trouble est discontinue, comme on le démontre en faisant un jet de mercure, et plaçant derrière un corps qui est alors visible, ce qui n'a pas lieu quand on regarde ce corps à travers la partie limpide.

Si l'on fait tomber des gouttes d'eau séparées par de petits intervalles, on a alors la sensation d'un jet continu présentant des étranglements et des renflements, ce qui prouve que la goutte d'eau, en tombant, s'aplatit et s'allouge alternativement. On rend sensible cette discontinuité du jet, et l'alternative de la forme des gouttes, en faisant mouvoir derrière la partie trouble d'une veine un plan noir portant des bandes blanches horizontales. Si ce plan monte tandis que le jet descend, et que la vitesse soit la même, les gouttes paraîtront comme fixes, et l'on pourra en discerner la forme.

Puisqu'un jet est discontinu, puisqu'il est soumis à des alternatives périodiques, on peut donc le comparer à une corde qui vibre: en approchant effectivement l'oreille d'un jet, on entend un son, il est vrai, mais très-faible. Si on reçoit ce jet sur une membrane, la chute successive des gouttes produit un son fort, qui est bien le son de la veine, puisqu'en le recevant sur des corps très-différents il reste toujours le même. Si on fait rendre ce même son à un instrument, même à une très-grande distance, on voit alors les ventres de la veine remonter aux dépens de la partie continue, et l'on remarque alors une extrême sensibilité dans le jet. Ce n'est que pour le son propre de la veine que ce relèvement des ventres a lieu; pour d'autres sons, quoique plus forts, il peut se montrer, mais bien plus faiblement.

La périodicité de l'écoulement se fait également apercevoir sur la partie limpide de la veine, car si on éclaire une partie, on y remarque des agitations très-régulières et rapides qui démontrent ce qui se passe à l'orifice. Il en est de même lorsque le jet est horizontal, oblique ou ascendant; on remarque, pour le jet horizontal ou incliné,

que lorsqu'on produit sur un instrument le son de la veine, elle se sépare en deux ou trois colonnes placées l'une au-dessus de l'autre dans le plan vertical. La veine, inclinée dans son état naturel, occupe plus d'espace dans le plan vertical que dans le plan horizontal, ce qui annonce que la trajectoire de toutes les gouttes qui forment la veine n'est pas la même. Lorsque le jet est presque vertical et de bas en haut, on observe de même une partie continue dans la veine, puis un ventre qui descend lorsqu'on produit le son qui convient au nombre de ses pulsations.

Une veine tombant dans un tube où l'on a fait le vide présente les mêmes particularités que celle qui tombe dans l'air. Lorsqu'on force la veine à s'ouvrir en lui présentant perpendiculairement un disque plan, il se forme une nappe unie au centre, striée à sa circonférence, et qui est agitée par des mouvements périodiques correspondant à ceux de la partie trouble de la veine. En recevant sur une membrane ou sur un corps mince cette partie extérieure de la nappe, on entend un son, et si ce son est renforcé par un instrument, la nappe se contracte fortement et devient beaucoup plus petite. De semblables expériences ont été faites avec des nappes de toutes formes, en variant l'orifice, le disque ou la pression.

Vibrations des corps rigides.

Les recherches qui ont été faites dans ces derniers temps sur les vibrations des corps solides, ne peuvent manquer d'avoir un grand intérêt pour la physique appliquée, en raison des notions qu'elles peuvent nous donner sur l'arrangement des molécules dans les corps. Savart est parvenu effectivement à reconnaître les axes différents d'élasticité d'un même corps, ainsi que plusieurs de leurs propriétés physiques. Nous reviendrons, ci-après, sur les résultats qu'il a obtenus.

Les corps solides dans lesquels on a étudié les vibrations sont les cordes, les membranes, les verges droites et courbes, les anneaux, les solides de révolution, pleins ou creux, les plaques, etc.

On distingue dans les corps deux modes de vibration : 1° les vibrations normales, dont le caractère est de lancer le sable répandu sur la surface du corps, normalement à la partie ébranlée, et de former sur les faces opposées des lignes nodales qui se correspondent; 2° les vibrations longitudinales ou tangentielles, c'est-à-dire, celles dans lesquelles le sable glisse parallèlement à la surface ébranlée, et sans la quitter. Les lignes nodales, considérées sur les deux faces opposées,

sont alternativement disposées. La découverte de cette dernière propriété est due à Savart, qui a enrichi l'acoustique d'une foule de découvertes importantes. Pour produire les vibrations, on emploie l'archet, et la mèche de crin pour ébranler les plaques par le centre; les chocs pour les vibrations longitudinales, du drap enduit de résine pour y exercer des frictions. Les moyens employés pour reconnaître les vibrations sont, pour les cordes, les chevalets, les anneaux de papier ou de fil de métal ; pour les plaques et les verges, le sable.

On produit encore des vibrations en ébranlant un corps fixé à un autre, qui est ainsi mis en mouvement; mais comme les vibrations sont toujours parallèles au sens de l'ébranlement, il en résulte qu'en ébranlant longitudinalement une verge soudée à une lame, à une plaque, ou y produit des vibrations normales, quand la verge qui vibre longitudinalement est perpendiculaire à leur plan, tandis qu'elles produisent des vibrations longitudinales, quand la verge est soudée dans le prolongement du plan. Chladni a fait encore une classe à part de vibrations, qu'il a appelées vibrations *tournantes*, lesquelles donnent une ou plusieurs lignes parallèles à la grande dimension des verges ou des cylindres; mais Savart a prouvé que ce mode n'est autre que celui des vibrations tangentielles, puisqu'il a tous les caractères de ces dernières; c'est pour ce motif qu'il les a appelées *vibrations tangentielles transversales*.

On est parvenu aussi à reconnaître le mouvement de vibration des masses fluides. Mille expériences prouvent que l'eau et les liquides entrent en vibration comme les gaz. La sirène peut servir à démontrer cette propriété des liquides, comme aussi les veines liquides qui s'échappent dans l'écoulement des fluides par des ouvertures en minces parois.

Passons rapidement en revue ce que nous savons sur les vibrations transversales des cordes.

Vibrations transversales des verges.

Les lois de ces vibrations ont été établies d'après la supposition que les cordes étaient parfaitement flexibles, et que leur rigidité était nulle; mais dans la nature, il n'y a aucune corde de cette espèce. Ces lois, comme l'expérience le démontre, sont d'autant moins exactes que les cordes sont plus grosses, et cela quelle que soit leur nature. Voici ces lois :

1° Les nombres de vibrations d'une corde sont en raison inverse

de sa longueur; 2° ils sont proportionnels aux racines carrées des poids qui la tendent; 3° quand les cordes sont de même matière, les nombres de vibrations sont en raison inverse de leur diamètre; 4° quand les cordes sont de matières différentes, les nombres de vibrations sont en raison inverse des racines carrées de leur densité. 5° Les vibrations sont proportionnelles aux épaisseurs. 6° La largeur est sans influence sur le son.

Quand on fait résonner une corde, on entend, outre le son fondamental, des sons dont le premier étant 1, les autres suivent la série des nombres naturels 2, 3, 4, 5, c'est-à-dire, que le deuxième est l'octave du premier, le troisième en est la double quinte, le quatrième la double octave, etc.

On a trouvé par l'expérience que cet effet provenait de ce que la corde ne vibrait pas seulement dans toute sa longueur, mais qu'elle se partageait encore en deux, en trois, en quatre parties, qui chacune vibrait séparément.

Une verge vibrant transversalement peut se trouver dans six conditions différentes : 1° la verge peut être libre aux deux bouts : dans ce cas, la série des sons est comme les carrés des nombres 3, 5, 7, 9, etc., quand les nombres des nœuds sont 2, 3, 4, 5, etc.; 2° la verge fixée aux deux bouts : les sons sont alors comme les carrés des nombres 3, 5, 7, 9, etc.; 3° la verge appuyée aux bouts : les sons sont comme les carrés des nombres 1, 2, 3, 4, 5, etc.; 4° la verge libre à un bout et appuyée à l'autre : les sons sont comme les carrés des nombres 5, 9, 13, 17, etc.; 5° la verge fixée à un bout et libre à l'autre : les sons sont comme les carrés des nombres 2, 5 pour 0 nœud et 1 nœud; pour les nœuds suivants 2, 3, etc., les nombres de vibrations sont comme les carrés des nombres 3, 5, 7, 9, etc.; 6° la verge appuyée à un bout et fixée à l'autre : les sons sont comme les carrés des nombres 5, 9, 13, 17.

Quand les verges sont courbées, l'expérience prouve que le son baisse, et cela d'autant plus que la courbure augmente et que les nœuds voisins des extrémités se rapprochent davantage du point de courbure. Nous ne devons pas oublier de rappeler que M. Weber a remarqué que si l'on fait tourner rapidement un diapason à l'instant où il vibre, le son cesse de se produire, et recommence à se faire entendre dès l'instant qu'on arrête le mouvement. Ce phénomène paraît dépendre de la force centrifuge qui tend à écarter les branches du diapason. Passons aux vibrations des anneaux à sections circulaires, rectangulaires, etc. Les nombres de nœuds sont toujours pairs; les vi-

brations pour 4, 6, 8, 10 nœuds sont comme les carrés des nombres 3, 5, 7, 9.

Savart a montré que les lignes nodales formées sur les faces des corps qui exécutent des vibrations longitudinales sont dues à des inflexions alternatives engendrées périodiquement par des contractions longitudinales qui s'effacent à chaque dilatation ; que les caractères des systèmes nodaux dépendent particulièrement de la forme des verges et du rapport de leurs dimensions ; enfin, que la comparaison des allongements des verges produits par les vibrations longitudinales et par des poids montrent qu'un léger ébranlement moléculaire peut donner lieu à un développement de forces qui paraît énorme, eu égard à la force qui le produit, et qui est d'autant plus extraordinaire qu'il semble proportionnel à l'aire de la section des verges. Pour les verges, les vibrations sont également en raison inverse des longueurs ; elles sont proportionnelles aux épaisseurs : la largeur n'exerce aucune influence sur le son.

Lorsque les verges sont de même nature et de même longueur, elles rendent toujours le même son, quelles que soient leur largeur et leur épaisseur ; mais il faut admettre pour cela que ces deux dimensions soient toujours beaucoup moindres que la première. Dans les tubes et les cylindres, Savart a reconnu que les lignes nodales forment des courbes à peu près semblables aux hélices. La surface intérieure des tubes ou cylindres présente également des lignes nodales semblables aux précédentes, mais qui sont diamétralement opposées.

On doit à Poisson un travail analytique sur l'équilibre et le mouvement des corps élastiques, dont voici les principaux résultats : 1° le carré du nombre des vibrations longitudinales d'une corde est au carré du nombre de ses vibrations transversales dans le même temps, comme sa longueur est à l'allongement qu'elle a éprouvé par la tension qu'elle supporte.

2° Lorsqu'une verge est fixe par une de ses extrémités, et qu'elle exécute successivement des vibrations longitudinales et des vibrations tournantes, le rapport du carré du nombre des vibrations longitudinales et du carré du nombre des vibrations tournantes est comme 5 : 2 ; il est indépendant par conséquent de la longueur et de l'épaisseur. Quand une verge cylindrique est libre par ses deux bouts, le nombre des vibrations longitudinales produites dans un certain temps est au nombre des vibrations transversales produites dans le même temps comme cent fois sa longueur est à trois cent cin-

quante-six fois son rayon. Enfin, dans une verge d'une longueur et d'une épaisseur données, le nombre des vibrations longitudinales est au nombre des vibrations transversales comme cent fois la longueur est à deux cent six fois l'épaisseur. Savart a vérifié l'exactitude de ces deux lois par l'expérience.

Vibrations des plaques, des membranes et des cloches.

La plaque est fixée convenablement, soit par son centre, soit par un point plus ou moins rapproché de son bord, et on l'ébranle avec un archet perpendiculairement à son plan ; on prend ensuite le ton avec un instrument quelconque. Pour observer les parties vibrantes et les lignes de repos appelées nodales, on projette du sable sec sur la surface.

Galilée est le premier qui ait indiqué ce moyen d'observation ; mais Chladni se l'est tellement approprié en 1787, que l'on peut le regarder également comme l'inventeur d'un moyen d'expérimentation qui a ouvert un vaste champ de recherches à l'acoustique ; et à l'aide duquel il a fait de très-belles découvertes.

Les plaques circulaires peuvent donner un système diamétral, un système concentrique et un système composé. Dans les plaques carrées, on distingue également trois systèmes analogues aux précédents : il en est de même des plaques triangulaires, rectangulaires, polygonales et elliptiques. Ces figures se produisent avec la même régularité, quelle que soit la nature des plaques, pourvu cependant que l'élasticité soit la même dans tous les sens.

Les membranes présentent des modes de vibration tout à fait analogues, comme Savart l'a observé; et il a encore remarqué dans le cours de ses expériences que les membranes passent avec une grande facilité d'un mode de vibration à un autre. Il a été conduit ainsi à supposer, puis à reconnaître par l'expérience, que, dans les vibrations des plaques, il existe divers modes de mouvements superposés comme dans les membranes et les cordes, et il a aussi reconnu que les lignes nodales étaient susceptibles de se déplacer, et que, dans certains cas, elles pouvaient osciller et même éprouver un mouvement de rotation plus ou moins rapide.

C'est en partant de cette conséquence que Savart a été conduit à un de ses plus importants travaux en acoustique : nous voulons dire à la détermination des axes de plus grande et de moindre élasticité dans les corps cristallisés et non cristallisés.

Des axes d'élasticité.

Jusqu'ici, on a supposé que les lames, disques ou autres corps vibrants étaient parfaitement homogènes, et que les figures nodales que présentaient les plaques circulaires, par exemple, dépendaient des points fixes ou des points ébranlés; mais il n'en est pas ainsi; la division en croix, par exemple, ne s'obtient que dans deux positions fixes à 45° l'une de l'autre, et encore pour chacun de ces corps le son est différent. Ce sont particulièrement les corps cristallisés et les métaux purs qui font entendre une plus grande différence de son, laquelle est quelquefois plus grande que pour le bois, où les lignes deviennent des hyperboles opposées au sommet lorsqu'on l'ébranle parallèlement aux fibres du bois.

Les alliages donnent une moindre différence de son. On n'a encore trouvé que deux corps, la cire d'Espagne et le bois coupé en travers dans une branche, dans lesquels les figures se missent dans toutes les positions, et dans lesquels par conséquent les axes d'élasticité fussent identiques.

Ces observations sur les axes d'élasticité ont fait naître à Savart l'idée de recherches intéressantes sur l'élasticité des corps qui cristallisent régulièrement, afin d'acquérir de nouvelles notions sur la structure intime des corps. Jusqu'ici, on n'avait que deux moyens pour étudier cette structure, le clivage pour les substances régulièrement cristallisées, et les modifications qu'éprouve la propagation de la lumière polarisée dans les substances transparentes. Le clivage montre seulement que les corps cristallisés sont des assemblages de lames parallèles à certaines faces du cristal, sans rien nous apprendre sur la force avec laquelle ces lames adhèrent entre elles, ainsi que sur leur élasticité. Le second est beaucoup plus efficace que le premier, puisque la lumière peut être considérée comme une sonde infiniment déliée qui pénètre dans les corps, et reçoit des modifications particulières dépendantes du mode d'agrégation des molécules.

Quand on fait naître des vibrations normales dans des lames circulaires, on remarque plusieurs modes de division : tantôt ces lames se partagent en un certain nombre de secteurs égaux, toujours de nombre pair, qui exécutent leurs vibrations dans un même temps, et qui sont séparés par des lignes nodales diamétrales; tantôt elles se partagent en un certain nombre de zones concentriques, séparées par des lignes nodales circulaires. On remarque encore que ces deux

modes de division se combinent quelquefois ensemble, de manière que les lignes acoustiques sont des lignes circulaires, divisées en parties égales par des lignes nodales diamétrales.

Quand la lame est homogène, circulaire et d'égale épaisseur, si la figure ne se compose que de lignes diamétrales, le système qu'elle forme se place dans toutes sortes de directions, de sorte qu'un point quelconque du contour de la lame étant pris pour point d'ébranlement, cette position détermine la position de la figure nodale. Pour les lignes circulaires elles sont, dans le même cas, concentriques à la circonférence de la lame. Voilà bien ce qui se passe, quand il y a homogénéité dans toutes les parties; mais il n'en est plus de même quand la symétrie n'existe plus : aussi dans ce cas, la position du point de l'ébranlement ne suffit plus pour déterminer la position des lignes nodales diamétrales, et si ces lignes sont des cercles, elles se changeront en ellipses ou en figures plus compliquées. Si, par exemple, on prend une lame de bois taillée parallèlement aux fibres, et qu'après l'avoir fixée légèrement par son centre, on cherche à lui faire produire le mode de division composé de deux lignes croisées rectangulairement, on trouve que l'une de ces lignes est dans le sens de la plus grande flexion et l'autre de la plus petite, et que si cette même lame est ébranlée à l'extrémité de ces lignes, on obtient un second mode de division qui donne une hyperbole dont les branches sont très-resserrées, laquelle a pour second axe celle des lignes croisées qui correspond au centre de la plus grande résistance à la flexion. Cet exemple seul montre que si l'on forme, avec diverses substances, des lames circulaires égales d'épaisseur, on pourra, par la position fixe ou indéterminée d'une figure acoustique composée de lignes nodales diamétrales, reconnaître si l'élasticité de la substance est la même dans toutes les directions.

En appliquant ce mode d'expérimentation à différents corps cristallisés régulièrement et confusément, tels que les métaux, le verre, le soufre, le cristal de roche, la chaux carbonatée, la chaux sulfatée, le plâtre, etc., Savart a trouvé que la figure acoustique, formée de deux lignes croisées rectangulairement, ne s'obtient que dans une seule position, et qu'il existe une seconde position pour laquelle on obtient deux lignes courbes hyperboliques accompagnées d'un son différent de celui qu'on obtient avec les lignes croisées. Il a trouvé aussi des lames qui ne donnent pas les deux lignes droites, mais bien deux systèmes de courbes hyperboliques, accompagnés de sons différents. Savart a reconnu de même que dans une masse de métal qui, au pre-

mier abord, paraît homogène, les lames prises suivant différentes directions ne donnent pas les mêmes modes de division. En analysant les sens d'élasticité des substances précédemment indiquées, il a été conduit à différents résultats importants pour l'étude de la constitution moléculaire des corps. Si l'on prend trois de ces plans formant entre eux des angles égaux, leur élasticité est la même. Si l'on taille une lame dans un prisme de cristal de roche, à peu près parallèlement à l'axe et non parallèlement à deux faces de l'hexaèdre, on peut, à l'aide seulement des figures acoustiques, distinguer quelles sont les faces de la pyramide qui peuvent se cliver. Quelle que soit la direction des lames, l'axe optique, ou sa projection sur leur plan, occupe une position qui est liée intimement avec l'arrangement des lignes acoustiques.

Les nombreuses expériences que Savart a faites sur le cristal de roche, montrent que cette substance ne peut être mise au nombre des substances à trois axes rectangulaires et inégaux d'élasticité, ni au nombre de celles dont les parties sont arrangées symétriquement autour d'une seule ligne droite, mais qu'elle renferme trois systèmes d'axes ou de lignes principales d'élasticité dont il a déterminé la direction. Il a ensuite démontré que la grande diagonale du rhomboèdre primitif doit être considérée comme l'axe intermédiaire d'élasticité; qu'un autre axe est la petite diagonale de la face losange du rhomboèdre primitif, cette ligne devant être regardée comme l'axe de plus grande élasticité de chaque système. Quant au troisième axe, il est perpendiculaire à l'axe intermédiaire, et forme, avec celui de plus grande élasticité, un angle de 57°40'13", qui est l'inclinaison de la face du rhomboèdre sur le plan diagonal. On voit donc que l'axe de plus grande élasticité et l'axe intermédiaire sont contenus dans le plan qui forme la face du rhomboèdre, qu'ils sont perpendiculaires entre eux, et que l'axe intermédiaire et l'axe de moindre élasticité, qui sont également perpendiculaires entre eux, se trouvent dans le plan diagonal. La chaux carbonatée transparente et la chaux carbonatée ferrifère paraissent posséder des propriétés élastiques analogues à celles du cristal de roche, c'est-à-dire, qu'elles renferment trois systèmes de lignes principales d'élasticité semblables entre eux.

Savart a avancé qu'il pourrait se faire que le cristal de roche, comme la chaux carbonatée, possédât des plans surnuméraires de clivage dirigés parallèlement aux plans diagonaux de son rhomboèdre primitif. La seule différence qu'il semble avoir trouvée entre la structure du quartz et celle de la chaux carbonatée, c'est que dans

celle-ci la petite diagonale du rhomboèdre est l'axe de moindre élasticité, tandis qu'elle est celui de plus grande élasticité dans la première. Ces deux exemples montrent donc que l'arrangement des figures acoustiques, et les vibrations sonores qui les accompagnent, sont toujours intimement liés avec les directions du clivage dans chaque lame. C'est ce rapport, que Savart n'a pu déterminer que dans quelques substances et qui nous laisse entrevoir les services que l'on peut attendre de l'acoustique, pour l'avancement de la physique moléculaire. Aussi est-il permis de croire que l'on parviendra, au moyen des vibrations sonores, à déterminer la forme primitive de certaines substances opaques, qui ne se prêtent pas à la division mécanique, et dans l'intérieur desquelles on ne peut introduire un faisceau de lumière polarisée.

De la communication des mouvements vibratoires des corps.

S'il nous importe de connaître la manière dont vibrent les molécules des corps, et les sons qui résultent des divers modes d'ébranlement qu'on leur imprime, nous devons aussi savoir comment les corps peuvent prendre l'état vibratoire par leur contact avec des corps en vibration. Il suffit de faire vibrer une corde, pour faire entrer également en vibration une corde placée à peu de distance et à l'unisson avec elle. De même une corde transmet aux particules d'une lame qu'elle touche un mouvement parallèle à celui qu'elle éprouve.

Savart a trouvé que la transmission ne se fait pas toujours de la même manière. Ainsi, une membrane tendue sur un cadre ne vibre pas de la même manière, quand on lui présente une plaque sonore perpendiculairement ou parallèlement. Dans le premier cas, les vibrations sont tangentielles; dans le second, elles sont normales. Quand diverses parties solides sont réunies et forment système, ce système ne forme plus qu'un tout, et se comporte comme tel quand une des parties est ébranlée.

Savart, qui a fait un grand nombre d'expériences sur la transmission des sons dans les corps solides, a été conduit à ce principe général, que, dans un système quelconque, toutes les molécules vibrantes exécutent un mouvement parallèle à l'ébranlement primitif. Si donc, le mouvement est produit au moyen d'un archet, toutes les molécules vibrent parallèlement à la ligne que parcourent les parties dont elle se compose.

Les liquides transmettent les mouvements vibratoires comme les

corps solides; Savart a reconnu qu'en faisant vibrer ces derniers dans l'eau, l'huile, le mercure, ces milieux n'exercent aucune influence sur les vibrations tangentielles, tandis qu'ils en exercent une très-grande sur les vibrations normales, ou plus ou moins obliques.

De tous les faits qui ont été exposés jusqu'ici, on peut conclure que lorsque l'on fait vibrer un corps, l'intensité des sons produits est augmentée 1° par les vibrations des corps sonores avec lesquels il est en contact; 2° par les vibrations des corps éloignés qui peuvent rendre des sons harmoniques, vibrations qui sont excitées par les chocs réitérés des ondes sonores; 3° par les échos voisins. Ce sont toutes ces causes réunies qui constituent la résonnance des corps.

Pour compléter les généralités que nous avons essayé de donner sur nos principales connaissances en acoustique, il nous faudrait parler de l'organe de l'ouïe, de la voix et des fonctions de ces deux organes. Mais, comme nous devons traiter avec quelques développements dans cet ouvrage, les diverses questions qui se rapportent à leur organisation et à leurs fonctions, nous nous abstenons d'en faire mention ici.

En terminant cette introduction, nous rappellerons de nouveau que notre but a été de présenter, en quelque sorte, un tableau raisonné des principaux faits, ainsi que les corps de doctrine qui *composent* aujourd'hui la physique, sans esprit de parti, sans prévention contre telle ou telle théorie, de manière que le lecteur puisse en quelques instants avoir une idée assez nette de l'état actuel de la partie de la physique qu'il veut consulter. Nous n'avons nullement la prétention de croire que nous n'ayons fait aucune omission; mais nous dirons que nous nous sommes attachés à n'omettre aucun des faits relatifs à la physique appliquée considérée dans ses applications à la chimie et aux sciences naturelles.

TRAITÉ DE PHYSIQUE

DANS SES RAPPORTS

AVEC LA CHIMIE ET LES SCIENCES NATURELLES.

EXPOSITION.

Lorsqu'un voyageur se transporte sur l'une des sommités des Alpes, ou de toute autre chaîne de montagnes, et que, de là, il contemple aussi loin que sa vue peut s'étendre ces rochers amoncelés comme autant de ruines, et ces mouvements ondulés du sol encore sensibles à de grandes distances, il demeure convaincu que des révolutions et des catastrophes violentes ont bouleversé la surface du globe à diverses époques. Si, revenu de la vive impression qu'a produite sur lui cet imposant spectacle, il parcourt ces ruines pour les interroger et y chercher des faits propres à lui faire connaître la nature des forces en action dans les premiers âges du monde, loin d'y rencontrer le chaos, tout lui annonce que ces grands cataclysmes, dont il voit partout des preuves irréfragables, sont le résultat de forces qui ont agi à diverses époques, et à chacune de ces époques dans une même direction. Si, continuant son exploration, il s'arrête devant les escarpements qui bordent les vallées, il les trouve la plupart du temps formés de dépôts de substances diverses, en couches parallèles, d'autant plus relevées à l'horizon qu'elles sont plus voisines des hautes chaînes, tandis que dans les plaines ces mêmes couches sont horizontales. Sur les versants opposés, les mêmes effets se représentent, mais en sens inverse. Ces faits lui annoncent donc qu'une cause intérieure a soulevé la surface du globe à différentes époques, et a produit ces chaînes de montagnes qui la sillonnent en tous sens.

Notre philosophe voyageur descend-il dans les excavations natu-

relles ou formées par l'art, il reconnait que fréquemment les terrains sont formés de dépôts ayant une origine aqueuse, en couches horizontales, renfermant des débris de végétaux et d'animaux, souvent dans un état parfait de conservation.

Vient-il à pénétrer plus avant dans les entrailles de la terre, il trouve de nouveaux débris d'animaux et de végétaux appartenant à des espèces qui s'éloignent de plus en plus de celles actuellement vivantes, et qui finissent par en être tout à fait différentes. Enfin, arrivé aux terrains primitifs, il ne voit partout que l'action du feu. Il conclut de toutes ses investigations que la terre a été primitivement à l'état gazeux, c'est-à-dire que tous les éléments qui la composent aujourd'hui se trouvaient disséminés à l'état de vapeurs dans un espace beaucoup plus étendu que celui qu'elle occupe actuellement; que le refroidissement successif de cet amas de vapeurs, conséquence inévitable du rayonnement de la chaleur dans les espaces célestes, a donné naissance aux roches et substances diverses qui composent les terrains primitifs; que, jusqu'à la formation des terrains intermédiaires ou de transition, époque de l'apparition des végétaux et des animaux, la nature organique a lutté longtemps contre la nature morte, et a fini par prendre le dessus; que cette marche de la vie, enfin, s'est faite graduellement dans les temps de calme qui succédaient aux révolutions subites qui, de temps à autre, *bouleversaient* la surface du globe. Ces révolutions ayant cessé, l'homme parut; et depuis lors, la nature semble avoir perdu la puissance de créer spontanément de nouveaux germes. Appuyons de preuves géologiques les données générales que nous venons de présenter.

On divise les terrains qui constituent la croûte superficielle du globe en quatre classes, composées chacune de plusieurs formations. Voici l'ordre de superposition de ces terrains, en commençant par les plus récents :

Terrains de transport, terrains d'alluvion ou terrains meubles..................	récents. moyens. anciens.
Terrains tertiaires.......	faluns. meulière. grès de Fontainebleau. gypse. calcaire grossier. argile plastique.

Terrains secondaires.....		craie.
		grès vert.
		terrain jurassique.
		grès bigarré.
		grès rouge.
Terrains de transition....	supérieurs	terrain houiller.
		calcaire métallifère.
		vieux grès rouge.
	inférieurs	calcaire de transition.
		ancien.
		grauwacke.
Terrains primitifs.......		schiste argileux.
		schiste talqueux.
		micaschiste.
		roches amphiboliques.
		gneiss.
		granite.
		syénite.

Nous n'indiquons pas dans ce tableau les terrains de position variable, et les terrains volcaniques dont nous n'avons pas à nous occuper.

Lors de la formation des terrains primitifs, la température des eaux et de la surface de la terre était trop élevée pour qu'elles pussent être habitées par des êtres organisés ; aussi, y a-t-il absence complète de restes organiques dans toutes les formations des terrains les plus anciens. Ce n'est que dans les terrains de transition ou intermédiaires que la vie organique a dû commencer. Mais comment s'est opérée la transition de la vie inorganique (si nous pouvons nous exprimer ainsi) à la vie organique ?

L'anatomie comparée nous apprend que les quatre grands embranchements qui existent actuellement, les vertébrés, les mollusques, les articulés, les rayonnés, ont paru en même temps que la vie organique sur le globe. Les vertébrés ne s'élevaient pas au delà des poissons ; les mollusques offraient plusieurs familles qui semblent avoir été répandues sur toute la surface terrestre. Parmi les articulés, on ne trouve que la famille éteinte des trilobites, qui déjà n'existait plus au commencement de la série secondaire ; les rayonnés, ceux dont les restes sont les plus nombreux, composaient une classe d'êtres remarquables par leur variété et leur beauté. Les végétaux de cette formation étaient peu nombreux, et presque tous des plantes marines ; mais

dans la formation supérieure, il existe une quantité considérable de plantes terrestres dans un état souvent parfait de conservation, et qui constituent la formation houillère. Dans la formation secondaire, on retrouve également des restes des quatre grands embranchements du règne animal : le globe n'était pas encore dans un état convenable pour que les mammifères terrestres à sang chaud pussent y vivre. Ce que l'on remarque de plus caractéristique, c'est la grande quantité de reptiles sauriens, dont les proportions étaient gigantesques ; il y en avait de marins, d'amphibies et de terrestres.

Dans la formation tertiaire, les végétaux et les animaux se rapprochent de plus en plus des espèces actuellement vivantes. Cette formation se compose de quatre autres, caractérisées chacune par les fossiles qui s'y trouvent : les espèces s'y sont successivement accrues. Dans la première, qui est le calcaire grossier, on trouve très-peu de coquilles que l'on puisse rapporter à des espèces vivantes ; dans la seconde, les coquilles fossiles analogues aux vivantes sont en minorité ; dans la troisième et la quatrième, qui comprennent les formations marines subapennines, les coquilles appartiennent, pour la plupart, à des espèces vivantes. Ces quatre grandes formations marines alternent avec une série quadruple de terrains d'eau douce. L'étude des fossiles nous apprend que dans ces diverses formations, le règne animal était constitué d'après les mêmes lois, et qu'il comprenait les mêmes classes et les mêmes familles que de nos jours.

Dans la seconde période, on trouve des genres éteints de mammifères lacustres de la première période, et les formes génériques les plus anciennes qui existent encore de nos jours. Les deux autres divisions des dépôts tertiaires d'eau douce abondent en espèces éteintes de pachydermes, dont les genres se sont perpétués jusqu'à nous, tels que les genres éléphant, rhinocéros, hippopotame, cheval, etc. On commence par y rencontrer des traces nombreuses de ruminants, tels que bœuf, cerf, etc., et le nombre des rongeurs devait s'être beaucoup accru, à en juger par l'abondance de leurs fossiles. Dans cette division et la précédente, les mers se sont peuplées de baleines, de dauphins, de phoques, dont les genres existent encore.

Dans les diverses formations successives que nous venons de passer en revue, le règne animal a suivi une marche progressive, mais on n'y a encore trouvé aucun débris fossile appartenant à l'espèce humaine. Il paraîtrait prouvé dès lors que l'homme soit la dernière œuvre de la création.

Mais quelles sont les forces qui ont concouru à la formation et à la

production de tous les corps qui se trouvent dans les eaux, à la surface et dans l'intérieur de la terre? Cette question est de la plus haute importance pour la philosophie naturelle; mais en ce qui concerne les corps organisés, sa solution est au-dessus de la portée de l'homme, car nous n'avons aucune donnée sur la nature des forces vitales et sur les causes qui ont concouru à la production des germes et à celle des molécules organiques. Notre ignorance est telle, que si, par une cause quelconque, les corps et les substances qui composent la terre venaient à être volatilisés par un excès de chaleur, et qu'il y eût ensuite un refroidissement graduel, les composés inorganiques se reformeraient d'après les lois connues, tandis que nous ne voyons pas comment les germes des animaux et des végétaux pourraient se reproduire. Il faut donc admettre l'existence d'une puissance créatrice qui s'est manifestée à certaines époques, et qui n'agit plus aujourd'hui que pour perpétuer les espèces actuellement vivantes, mais non pour former de nouveaux germes.

Des faits généraux que nous venons de rapporter nous devons conclure que, depuis la formation des terrains de transition, tous les corps ont pu et peuvent encore être divisés en deux grandes classes. Dans la première sont rangés les corps doués de la vie, dans la seconde, ceux qui en sont privés.

Les corps de la première classe sont composés de parties qui sont essentiellement différentes sous le rapport de la forme, de la composition et des fonctions qu'ils doivent remplir. En détacher une ou plusieurs, ce serait altérer, détruire quelquefois les corps eux-mêmes. Ces parties, indispensables à l'existence des corps, ont été nommées *organes*, et les corps eux-mêmes *corps organisés*, tandis que l'on a appelé *corps inorganisés*, ceux dont toutes les parties similaires peuvent être divisées, subdivisées, sans pour cela cesser d'exister.

Tous les corps jouissent de propriétés physiques dépendantes de leur organisation, s'ils appartiennent à la première classe, et de leur nature, de leur arrangement moléculaire ainsi que des forces qui président à leur constitution et à leur composition, s'ils font partie de la seconde. L'étude des forces et de la constitution des corps est donc liée à celle de leurs propriétés physiques, et ne saurait en être séparée. L'ensemble des connaissances auxquelles conduit cette double étude constitue le domaine de la physique envisagée sous le point de vue le plus général, et par conséquent dans ses rapports avec la chimie et les sciences naturelles.

Considérons d'abord les corps inorganisés, qui se prêtent mieux

que les corps organisés aux investigations du physicien, en raison d'une constitution plus simple. Ces corps sont formés de la réunion d'une infinité de particules élémentaires, nommées *atomes*, semblables ou hétérogènes, suivant que les corps sont simples ou composés. Ces atomes, en se groupant d'après des lois simples, donnent naissance à des atomes composés du deuxième et du troisième ordre, lesquels, en se groupant, produisent des molécules entourées de chaleur qui s'oppose sans cesse à leur action attractive. La quantité de chaleur intermoléculaire vient-elle à augmenter ou à diminuer, la distance entre les molécules devient ou plus grande ou plus petite, et le volume des corps éprouve des variations correspondantes qui produisent souvent un nouvel arrangement de molécules. Outre la chaleur, on fait encore intervenir dans la constitution des corps les affinités et l'électricité.

Les molécules des corps sont donc soumises à plusieurs systèmes de forces qui produisent des actions attractives et des actions répulsives; suivant que les premières l'emportent sur les secondes ou sont vaincues par elles, les corps sont solides, liquides ou gazeux. Les molécules étant tenues à des distances plus ou moins grandes, suivant l'état des corps, il existe nécessairement entre elles des espaces interstitiels, où les agents impondérables luttent sans cesse avec les principes matériels des corps. C'est dans ces espaces, dont l'étendue échappe à nos sens, que s'opèrent les phénomènes de l'électricité, de la lumière, de la chaleur, des affinités et de l'attraction moléculaire. C'est donc aussi là que l'on doit rechercher ces agents pour étudier leurs propriétés et le mode d'action de chacun d'eux sur les molécules. Pour atteindre ce but, il faut décrire les corps, constater l'existence des agents impondérables, les retirer des espaces intermoléculaires et examiner ensuite comment ces derniers concourent, soit isolément, soit simultanément, à la composition et à la formation des corps. Tel est le point de vue sous lequel nous envisageons l'étude de la physique appliquée à la chimie et aux sciences naturelles. Mais comme cette science ne peut être fructueusement cultivée qu'autant que l'on possède des notions générales sur la formation des corps, leur structure, leur organisation, nous croyons utile d'exposer, en commençant, les données les plus indispensables à cet égard, afin d'éviter au lecteur qui ne s'en serait pas occupé la peine de recourir à des ouvrages spéciaux, dans lesquels ces données ne seraient peut-être pas présentées dans un cadre assez resserré pour en prendre sur-le-champ une idée générale.

Dans les ouvrages de physique, on s'occupe, en général, des propriétés des corps, abstraction faite de leur nature; tandis que dans la physique appliquée, chaque corps est considéré comme un instrument que l'on interroge pour en obtenir des effets dépendant de sa constitution ou de son organisation. Mais, de même que l'on décrit en physique un instrument avec lequel on doit expérimenter, de même aussi faut-il avoir des notions sur les corps dont on veut étudier les propriétés physiques. En suivant cette marche, nous n'avons nullement l'intention de donner les éléments de chimie et des diverses branches des sciences naturelles, puisque nous ne nous occuperons ni de la classification des corps, ni des rapports qui lient les corps entre eux. Notre but, nous le répétons, est seulement de présenter, dans un cadre assez resserré, les connaissances nécessaires au lecteur pour se faire une idée de la constitution des corps qui doivent être le sujet de nos investigations.

LIVRE PREMIER.

DE LA STRUCTURE DES CORPS.

CHAPITRE PREMIER.

Composition atomique des corps inorganisés.

Il y a quatre moyens d'étudier la structure des corps inorganisés: 1° le clivage, pour les corps régulièrement cristallisés, opaques ou transparents; 2° l'action de la lumière polarisée pour tous les corps transparents, cristallisés régulièrement ou confusément; 3° les vibrations pour les corps qui peuvent être taillés en plaques, suivant différentes directions; 4° l'électricité pour les corps cristallisés qui *dérogent* à la loi de symétrie; mais, pour l'instant, nous ne nous servirons que des résultats de l'analyse chimique et du clivage qui, en raison de son mode d'action simple, est à la portée de tout le monde, et suffit pour donner des notions assez étendues sur la structure des corps; nous n'emploierons la lumière polarisée qu'en traitant de son action sur les corps.

Un corps est formé de parties matérielles qui peuvent être séparées plus ou moins facilement les unes des autres, à l'aide de la division mécanique. S'il était possible d'atteindre le dernier terme de cette division, on aurait la molécule intégrante ou constitutive, composee elle-même de particules elémentaires ou atomes, semblables ou hétérogènes, suivant que le corps est simple ou composé, et qui ne pourraient être séparés que par des moyens chimiques ou physiques. La forme et le volume réel de ces atomes échappent à nos sens, même en nous aidant du microscope du plus fort grossissement. Nous ignorons également quel est leur poids réel; mais nous avons les moyens de déterminer leur poids et leur volume relatifs ou spécifiques; c'est ce dont nous allons nous occuper. Quant à leur forme,

on pense assez généralement qu'elle est sphérique, attendu que c'est celle qu'affecte la matière quand elle n'est soumise à aucune force étrangère. On admet encore que les atomes simples ou composés, en se groupant, produisent, comme nous l'avons déjà dit, des molécules constitutives, dont la forme dépend de leur nombre, de leur mode d'arrangement et de certaines conditions dont nous parlerons ci-après.

On peut imaginer bien des théories pour déterminer les rapports existant entre la forme des atomes composés, le nombre et le groupement des atomes simples; mais on ne doit prendre en considération que celles qui rendent compte du plus grand nombre de faits connus, avec l'intention, toutefois, de les remplacer par d'autres dès l'instant que de nouvelles découvertes ne peuvent plus s'y rattacher. Mais avant d'exposer quelques-unes de ces théories, faisons connaître les lois suivant lesquelles les atomes hétérogènes se réunissent ou plutôt se combinent, pour donner naissance à des atomes composés. Nous ne parlerons pas des tentatives faites successivement par Descartes, Swedenberg, etc., etc., pour arriver de suite aux équivalents chimiques, qui ont commencé à donner une idée des combinaisons en proportions définies.

Wenzel publia, en 1777, un ouvrage sur la théorie des affinités, dans lequel il s'appliqua à démontrer, en s'appuyant sur des analyses très-exactes, que les combinaisons n'étaient pas variables et indéfinies comme on le croyait généralement, que deux sels neutres qui se décomposaient réciproquement donnaient naissance à deux sels parfaitement neutres, et qu'il existait un rapport tel entre les poids des deux bases nécessaires pour saturer un même poids d'acide, que ce rapport ne changeait pas, quel que fût l'acide, et réciproquement. Cet ouvrage, quoique rempli d'idées neuves et justes, attira peu l'attention des chimistes de l'époque, tant les grandes découvertes de Lavoisier les préoccupaient tous.

Richter ayant repris peu de temps après les recherches de Wenzel, en confirma l'exactitude, et découvrit en outre ce fait important, que les oxydes exigeaient, pour être neutralisés, des quantités d'acide proportionnelles à la quantité d'oxygène qu'ils contenaient, et qu'il existait un rapport constant entre l'acide d'un sel et l'oxygène de sa base. M. Berzelius fit voir ensuite que dans les combinaisons des bases avec les acides nitrique et sulfurique, le rapport de l'oxygène des bases et celui des acides était comme 1 : 3, 1 : 5.

La théorie des proportions chimiques en était là quand M. Dalton posa ce principe, dans un ouvrage publié en 1810, que les combinai-

sons des corps s'opèrent entre des atomes élémentaires et non entre des fractions d'atome. Si deux corps, par exemple, forment plusieurs combinaisons, ces combinaisons s'effectuent ainsi : un atome du premier avec un atome du second, d'où résulte un atome composé du second ordre ou *binaire*, ou bien un atome du premier avec deux atomes du second, etc. N'existe-t-il qu'une seule combinaison ? elle a ordinairement lieu entre deux atomes simples ; s'il y en a deux, l'une est formée d'atomes binaires, l'autre d'atomes ternaires, ainsi de suite.

Des expériences faites par MM. Gay-Lussac et de Humboldt, en 1806, sur les combinaisons des substances gazeuses, vinrent confirmer les vues théoriques de Dalton, en démontrant que les corps gazeux se combinent ensemble dans des proportions fixes et multiples par un nombre entier de leur volume. En effet, MM. Gay-Lussac et de Humboldt prouvèrent qu'un volume de gaz oxygène, combiné avec deux volumes de gaz hydrogène, produit de l'eau ; que toutes les substances gazeuses qui forment des composés se combinent ou à volumes égaux, ou dans des proportions telles que le volume de l'un est un multiple en nombre entier de l'autre, et que la contraction, quand elle a lieu, est toujours en rapport simple avec le volume primitif, comme on le voit dans le tableau suivant :

VOLUME DE L'UN DES GAZ.	VOLUME DE L'AUTRE GAZ.	QUANTITÉS PRODUITES PAR LA COMBINAISON DES DEUX GAZ.
200 de gaz hydrogène..	100 d'oxygène........	.... de l'eau.
300 id................	100 d'azote...........	.... 200 de gaz ammoniac.
100 id................	100 de chlore....	.... 200 de gaz hydrochlorique.
100 de gaz azote.......	50 de gaz oxygène....	.... 100 de protoxyde d'azote.
100 id................	100 id................	.... 200 de deutoxyde.
100 id................	150 id................	.... de l'acide hyponitreux.
100 id................	200 id................	... de l'acide nitreux.
100 id................	250 id................	.... de l'acide nitrique.

Ces résultats prouvent que les éléments des corps gazeux se combinent entre eux dans des proportions fixes et multiples relativement à leur volume, de même que Dalton l'avait avancé relativement au poids : on en tira alors la conséquence que les lois des combinaisons gazéiformes sont les mêmes que celles qui président aux combinaisons des substances solides ou liquides. En comparant ensemble la

théorie atomique et la théorie des volumes, on en déduisit que, dans les gaz, les atomes sont placés à égale distance, et qu'il y en a le même nombre à volume égal, à même température et à même pression; M. Dumas reconnut cependant que les vapeurs faisaient exception; 1° dans la vapeur de phosphore, où le nombre d'atomes est double de celui du même volume de gaz permanent; 2° dans celle du soufre, il est triple; 3° dans celle du mercure, ce nombre est moitié. Enfin, dans les vapeurs des corps simples, le rapport entre le volume et le nombre des atomes paraît être des multiples ou sous-multiples du nombre d'atomes contenus dans un égal volume d'un gaz permanent. Mais avant d'exposer les rapports qui existent entre la théorie des atomes et celle des volumes, nous avons besoin de données fondamentales sans lesquelles nous ne pourrions en tirer des conséquences en harmonie avec l'état actuel de la science.

Passons d'abord en revue quelques-unes des lois en vertu desquelles les atomes se combinent dans la nature inorganique. Un atome d'un élément se combine, avons-nous dit, avec un, deux, trois, etc., atomes d'un autre élément; mais on ignore jusqu'où peut aller le nombre de ces derniers; on a avancé qu'il ne pouvait pas dépasser douze, en raison de la forme présumée sphérique des atomes, et parce qu'une sphère ne pouvait être mise en contact avec plus de douze sphères de même grandeur, de manière à l'entourer entièrement. Si l'on démontrait que la forme des atomes fût sphérique, cette conjecture pourrait se changer en vérité; au surplus, on ne connaît pas de combinaisons inorganiques qui dépassent ce rapport. Mais si un atome d'un élément se combine avec un, deux, trois, etc., atomes d'un autre élément, deux atomes du premier peuvent-ils se combiner avec deux, quatre, six atomes du second? nous l'ignorons. L'exemple suivant montre notre incertitude à cet égard : l'eau est composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène; si elle se combine avec un autre atome d'oxygène, elle forme de l'eau oxygénée; en résulte-t-il alors deux atomes de peroxyde, composés chacun d'un atome d'oxygène et d'un atome d'hydrogène, ou bien un seul atome composé de deux atomes de chaque élément? L'incertitude est la même à l'égard de la composition de l'ammoniaque formée d'un atome d'azote et de trois atomes d'hydrogène condensés en deux volumes. Jusqu'ici, les faits manquent pour décider l'alternative. Les combinaisons des atomes composés suivent les mêmes lois; mais elles ne s'effectuent pas dans un aussi grand nombre de proportions, attendu que les affinités diminuent à mesure que les atomes deviennent plus composés; c'est ainsi que les atomes du troisième ordre n'ont qu'une affinité

tres-faible qui ne se manifeste que dans les actions très-lentes. On est également dans l'ignorance sur les nombres de combinaisons qui peuvent s'effectuer entre les atomes composés et ies atomes simples.

Les combinaisons des atomes composés sont soumises néanmoins à certaines conditions qui restreignent leur nombre.

Dans les sulfates neutres, par exempie, la quantité d'oxygène de l'oxyde est à ceile de l'acide : : 1 : 3 ; ce rapport est une conséquence de la composition atomique des suifates, dans lesquels la base est composée d'un atome de métal et d'un atome d'oxygène, l'acide, d'un atome de soufre et de trois d'oxygène.

Dans les sulfites, la quantité d'oxygène de l'oxyde est à celle de l'acide : : 1 : 2.

Dans les hyposulfites, ce rapport est : : 1 : 5.

Dans les	séléniates	: : 1 : 3
—	sélénites	: : 1 : 2
—	nitrates	: : 1 : 5
—	hyponitrites	: : 1 : 2
—	phosphates neutres	: : 2 : 5
—	phosphites	: : 2 : 3

Dans les arséniates et les arsénites, dont la composition est la même que celie des phosphates neutres et des phosphites, les rapports entre les quantités d'oxygène sont les mêmes.

Dans les	borates, ces quantités sont	: : 1 : 3
—	carbonates	: : 1 : 3
—	perchlorates	: : 1 : 7

Ces rapports, nous le répétons, sont une conséquence de ia composition atomique de tous ces sels.

Le rapport 3 : 2 se présente quand les acides, à un degré inférieur d'acidification, composés de deux atomes de radical et de trois atomes d'oxygène, s'unissent aux bases.

Le rapport 3 : 4 dans la combinaison d'un acide, à un degré inférieur d'acidification avec un excès de base, comme le nitrite quadriplombique; enfin, les rapports plus composés se trouvent dans les sels neutres et les sels basiques provenant de combinaisons de bases avec des acides qui contiennent deux atomes de radical et cinq atomes d'oxygène.

Dans les combinaisons des atomes composés du second ordre, on trouve des rapports semblables; c'est-à-dire, que l'acide, dans un des sels, est un multiple par un nombre entier de l'acide dans l'autre, comme l'alun et le feldspath en sont des exemples; le nombre

des atomes d'oxygène de l'alumine est le triple de celui des atomes de la potasse, de même que la quantité d'acide sulfurique et d'acide silicique combinés avec l'alumine est le triple de celle qui est combinée avec la potasse; pareillement, quand la base est commune dans les atomes composés du deuxième ordre, le nombre des atomes d'oxygène de l'une des bases est un multiple par un nombre entier du nombre des atomes d'oxygène de l'autre base, comme nous en avons la preuve dans la datholithe, qui est une combinaison de borate et de silicate de chaux; dans le carbonate de cuivre, où la base est partagée entre l'acide carbonique et l'eau.

Telles sont les lois générales observées jusqu'ici, et d'après lesquelles s'effectuent les combinaisons des atomes tant simples que composés dans les corps inorganisés. Nous n'avons plus maintenant qu'à indiquer la méthode à l'aide de laquelle on détermine le nombre et le poids relatifs des atomes qui entrent dans une combinaison.

Cette méthode étant exposée avec de grands développements dans les traités de chimie, nous devons nous borner à l'indiquer d'une manière générale : une fois que l'on a trouvé le nombre d'atomes simples qui se trouvent dans une combinaison, le poids n'offre plus de difficultés pour être obtenu; mais il n'est pas toujours facile de déterminer ce nombre, car on a souvent à choisir entre plusieurs, et l'on n'a pour décider que des considérations chimiques qui peuvent laisser dans l'incertitude surtout le physicien.

Les corps dont on veut déterminer le poids atomique peuvent être gazeux ou solides; dans le premier cas, on part de ce principe que deux volumes égaux de gaz, à la même pression et à la même température, renferment le même nombre d'atomes; le rapport de leur densité sera celui de leur poids atomique. Or, la densité de l'oxygène étant 1,1026, celle de l'hydrogène 0,0687, si l'on represente le poids atomique du premier gaz par 100, celui de l'hydrogène sera 6,23; par ce moyen, on peut déterminer le poids atomique du chlore, de l'azote et de quelques autres corps naturellement gazeux; mais comme le nombre en est assez restreint, si l'on veut étendre cette méthode aux corps qui forment des combinaisons gazeuses, il faut avoir recours à la loi des volumes de M. Gay-Lussac précédemment énoncée. C'est ainsi que l'on a pu déterminer le poids atomique du soufre, du phosphore, de l'arsenic et du carbone. Prenons le soufre : pour avoir la densité de sa vapeur, il faut supposer que l'acide sulfurique se compose d'un volume d'hydrogène et d'un demi-volume de vapeur de soufre; on est guidé dans cette supposition par la composition de la vapeur d'eau, et par l'analogie qui existe entre ce corps et l'oxygène

qui se comportent de la même manière dans leurs combinaisons. On voit par là une preuve de l'incertitude où l'on est, quand on cherche à déterminer la composition atomique de quelques corps; il faut ajouter cependant que l'on a quelquefois les moyens de s'assurer si la détermination du poids atomique est exacte ou non; on s'appuie entre autres sur la loi de Petit et Dulong, sur la chaleur spécifique des corps simples, savoir que le produit du poids de chaque atome, par la capacité calorifique correspondante, est une quantité constante; dès lors, connaissant la chaleur spécifique d'un corps, il est facile d'obtenir le poids atomique; mais cette belle loi, quoique existant réellement, ne se vérifie qu'entre certaines limites, comme l'a fait voir M. Regnault, de sorte qu'il faut se mettre en garde contre les inductions qu'on en tire.

Si les corps sont solides, on opère comme il suit: supposons que la combinaison de deux corps résulte de l'union d'un atome de l'un avec un atome de l'autre, il est évident que le rapport des poids atomiques sera le même que celui du poids de chaque corps. En prenant un des poids pour unité, l'autre exprimera le poids d'un atome en fonction de celui de l'autre. Appliquons cette règle au protoxyde de plomb : 100 parties de plomb se combinent avec 7,725 parties d'oxygène; en représentant par 100 le poids atomique de l'oxygène, on aura 1294,478 pour celui du plomb. L'oxyde de cuivre est composé d'un atome de cuivre et d'un atome d'oxygène; or, comme en réduisant 7gr.,68075 d'oxyde par le gaz hydrogène, il en résulte une perte de poids égale à 1,55 gr. d'oxygène enlevé, il s'ensuit qu'un atome de cuivre pèse 395,695. Toutes les combinaisons ne se prêtent pas aussi facilement à de semblables calculs, car il y a souvent de l'incertitude sur leur véritable composition atomique, qu'on ne peut lever qu'en s'appuyant sur des considérations chimiques qui ne sont pas de notre ressort. Passons à un exemple d'un autre genre.

D'après la théorie des volumes, l'eau est formée de deux volumes d'hydrogène et d'un volume d'oxygène, et par suite de deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène; M. Berzelius ayant trouvé que le poids de l'oxygène était égal à 88,904 et celui de l'hydrogène à 11,096 pour 100 d'eau, on en conclut que le rapport du poids de l'hydrogène est à celui de l'oxygène comme 1 : 8,012; mais M. Dumas, dans un travail récent sur l'analyse de l'eau, a montré que l'hypothèse de M. Prout était exacte, et que, sauf les erreurs d'expériences, ce rapport était celui de 1 à 8, et qu'on devait le prendre pour celui des poids atomiques. Or, l'analyse, comme on vient de le voir, ayant donné en poids, 88,904 d'oxygène, et 11,096 d'hydrogène, si donc

on représente par 88,904 le poids de l'atome d'oxygène, celui de l'atome d'hydrogène sera égal à 11,096, ou 5,548, ou bien en représentant le premier par 100, le second aura pour valeur 6,24. Il est facile, en comparant ensemble diverses combinaisons dans lesquelles se trouvent les mêmes corps, de former une table atomique de tous les corps. Ce travail étant du domaine de la chimie, nous nous contenterons de donner seulement dans les tableaux suivants les poids atomiques des corps simples dont nous aurons quelquefois besoin dans le cours de cet ouvrage.

Poids atomiques des corps simples, d'après M. Berzelius.

	CELUI DE			CELUI DE	
	deux ato. d'hydro. = 1	un ato. d'oxyg. = 100		deux ato. d'hydro. = 1	un ato. d'oxyg. = 100
Oxygène	8,01	100	Argent	108,30	1351,61
Hydrogène	1	6,2398	Mercure	101,43	1265,82
Azote	7,09	88,52	Cuivre	31,71	395,70
Soufre	16,12	201,17	Urane	217,26	2711,36
Phosphore	15,72	196,14	Bismuth	71,07	886,92
Chlore	17,74	221,33	Étain	58,98	735,29
Brome	39,20	489,15	Plomb	103,73	1294,50
Iode	63,28	789,75	Cadmium	55,83	696,77
Fluor	9,37	116,90	Zinc	32,31	403,23
Carbone	6,13	76,44	Nickel	29,62	369,68
Bore	10,91	136,25	Cobalt	29,57	368,99
Silicium	22,22	277,31	Fer	27,18	339,21
Sélénium	39,63	494,58	Manganèse	27,78	345,89
Arsenic	37,67	470,04	Magnesium	12,69	158,35
Chrôme	28,19	351,82	Cérium	46,05	574,70
Molybdène	47,96	598,52	Thorium	59,83	744,90
Tungstène	94,80	1183,00	Zirconium	33,67	420,20
Antimoine	64,62	806,45	Yttrium	32,25	402,51
Tellure	64,25	801.76	Vanadium	68,66	856,89
Tantale	92,45	1153,72	Glucium	26,54	331,26
Titane	24,33	303,66	Aluminium	13,72	171,17
Or	99,60	1243,01	Calcium	20,52	256,02
Osmium	99,72	1244,49	Strontium	43,85	547,29
Iridium	98,84	1233,50	Barium	68,66	856,88
Platine	98,84	1233,50	Lithium	6,44	80,33
Palladium	53,36	665,90	Sodium	23,31	290,90
Rhodium	52,20	651,39	Potassium	39,26	489,92

Tous ces poids atomiques ne sont pas exprimés en nombres entiers. M. Dumas pense comme M. Prout, que l'on peut supprimer les fractions, attendu qu'elles se trouvent dans les limites des erreurs que l'on peut commettre dans la détermination de ces poids. Nous donnons ici, d'après lui, le tableau des poids atomiques des corps simples, en représentant l'hydrogène par 1, en faisant remarquer qu'il considère l'eau comme composée d'un atome d'oxygène et d'un atome d'hydrogène.

Tableau des poids atomiques des corps simples, d'après M. Dumas.

Hydrogène........ H. 1.

Oxygène.............. O.8	
Soufre................ S.16	
Sélénium............. Se.40	
Tellure............... T.64	
—	
Fluor................. Fl.9	
Chlore................ Ch.18	
Brome................ Br.39	
Iode.................. I.63	
Or.................... Au.100	
Platine................ Pl.98	
Iridium............... Ir.98	
Palladium............. Pl.53	
Osmium............... Os.100	
Rhodium.............. R.52	
—	
Argent................ Ag. 54	
Mercure............... Hg.100	
Cuivre................ Cu.32	
—	
Plomb................ Pl.104	
—	
Bismuth.............. Bi.60	
Étain................. Sn.58	
Titane................ Ti.34	
Tantale............... Ta.92	
—	
Nickel................ Ni.30	
Cobalt................ Co.30	
Cadmium.............. Cd.56	
Zinc.................. Zn.34	
	Azote................ Az.7
	Phosphore............ Ph.16
	Arsenic.............. As.38
	Antimoine............ Sb.64
	—
	Carbone.............. C.6
	Bore................. B.11
	Silicium............. Si.22
	Zirconium............ Zr.68
	Potassium............ K.20
	Sodium............... Na.12
	—
	Lithium.............. Li.6
	Barium............... Ba.64
	Strontium............ Sr.44
	Calcium.............. Ca.20
	Magnésium............ Mg.12
	—
	Yttrium.............. Y.32
	Cérium............... Ce.46
	Thorium.............. Th.60
	—
	Glucinium............ Gl.26
	Aluminium............ Al.14
	Manganèse............ Mn.28
	Fer.................. Fe.27
	Chrôme............... Cr.28
	—
	Vanadium............. Vn.68
	Uranium.............. U.60
	Tungstène............ Tu.96
	Molybdène............ Mo.48

Nous allons exposer maintenant les recherches qui ont été faites pour arriver à déterminer les volumes relatifs des atomes, et les lois qui régissent les combinaisons solides ou liquides d'après les volumes.

M. Dumas est un des premiers qui se soit occupé de recherches relatives aux rapports qui existent entre le poids atomique des métaux et leur pesanteur spécifique. Il partit de ce principe, que le poids de deux corps simples à volumes égaux et celui de leurs particules étant connus, on pouvait comparer ensemble le nombre de leurs atomes pour des volumes égaux de matière. Ainsi, en désignant par D et d les densités de deux corps, par P et p leurs poids atomiques, $\frac{D}{P}$ et $\frac{d}{p}$ représentaient des quantités proportionnelles au nombre des atomes de ces deux corps sous le même volume. En effet, en désignant par N et n le nombre d'atomes contenus dans le volume pris pour unité, on a $D = NP$ et $d = np$, d'où l'on tire $N = \frac{D}{P}$ et $n = \frac{d}{p}$. En appliquant ce principe à divers exemples, M. Dumas a trouvé 1° que le fer, le cobalt, le nickel, le cuivre, le manganèse et le carbone avaient le même nombre d'atomes à volumes égaux, ce qui revenait à dire que ces métaux avaient le même volume spécifique ; 2° que le platine, le palladium, le rhodium, le chrôme, le titane et le zinc offraient la même particularité, avec cette différence néanmoins que leur volume spécifique était différent de celui des métaux précédents ; 3° qu'il en était de même à l'égard du molybdène et du tungstène d'une part, du plomb, du sélénium et du phosphore de l'autre, etc. Ces faits, et les conséquences qui en découlent, se trouvent consignés dans le traité de chimie de M. Thénard, cinquième volume, dernière édition, p. 445 et suivantes.

M. Hermann Kopp vient de reprendre la question au point où l'avait laissée M. Dumas, dans un mémoire récemment publié (Annales de chimie et de physique, t. IV, nouvelle série, p. 460). Les résultats consignés dans ce mémoire sont d'une telle importance pour la physique moléculaire, que nous croyons devoir rapporter ceux qui sont de nature à nous éclairer sur les relations qui existent entre les combinaisons et leurs propriétés physiques.

M. Kopp a pris, comme M. Dumas, pour volume spécifique d'un corps, le quotient de la division du poids atomique par la densité du corps auquel appartient cet atome. On trouvera dans le tableau suivant les poids atomiques des corps simples et les volumes spécifiques résultant de l'observation et de considérations théoriques, ainsi que les densités observées et calculées d'après les données qu'on va indiquer.

SUBSTANCES.		POIDS ATOMIQUE.	VOLUME SPÉCIFIQUE PRIMITIF.	DENSITÉ CALCULÉE.	DENSITÉ OBSERVÉE.
Antimoine.	Sb	806	120	8,72	6,70 Karsten; 8,6 Breithaupt; 6,86 Muschenbroek.
Argent.....	Ag	1352	130	10,4	10,4 Karsten.
Arsenic....	As	470	80	5,87	5,70, 5,96 Guibourt; 5,62 Karsten; 5,67 Herapath
Bismuth...	Bi	1330	135	9,85	9,88 Thenard; 9,83 Herapath; 9,85 Karsten.
Brome.....	Br	489	160	3,06	2,99 Loewig; 2,97 Balard.
Cadmium..	Cd	697	81	8,60	8,66 Herapath; 8,63 Karsten, Kopp; 8,60 Stromeyer.
Chlore.....	Cl	221	160	1,38	1,33 Faraday.
Chrôme....	Cr	352	69	5,10	5,10 Thomson.
Cobalt.....	Co	369	44	8,39	8,49 Brunner; 8,51 Berzelius; 8,71 Lampadius.
Cuivre.....	Cu	396	44	9,00	8,98 Berzelius; 9,00 Muschenbroek; 8,72 Karsten.
Cyanogène.	Cy	165	160	1,03	Environ 0,9 Faraday.
Étain......	Sn	735	101	7,28	7,28 Herapath; 7,29 Kupffer, Karsten.
Fer........	Fe	339	44	7,70	7,6 7,8 Broling; 7,79 Karsten.
Iode.......	I	789	160	4,93	4,95 Gay-Lussac.
Iridium....	Ir	1233	57	21,6	19,5 Mohs; 23,5 Breithaupt.
Manganèse.	Mn	348	44	7,86	8,03 Bachmann; 8,01 John.
Mercure...	Hg	1266	93	13,6	13,6 Kupffer, Karsten, Cavallo.
Molybdène.	Mo	599	69	8,68	8,62 8,64 Bucholz.
Nickel.....	Ni	370	44	8,41	8,40 Tourte; 8,38 Tupputi; 8,60 Brunner.
Or.........	Au	1243	65	19,1	19,26 Brisson.
Osmium ..	Os	1244	57	21,8	Natif: 19,5 (?) Thenard.
Palladium.	Pd	666	57	11,7	11,3 Wollaston; 12,1 Lowry.
Phosphore.	P	196	111	1,77	1,77 Berzelius.
Platine....	Pt	1233	57	21,6	21,0 Borda; 21,5 Berzelius; 23,5 Cloud.
Plomb.....	Pb	1294	114	11,35	11,33 Kupffer; 11,39 Karsten; 11,35 Herapath.
Potassium.	K	490	583	0,84	0,86 Gay-Lussac et Thenard; 0,87 Sementini.
Rhodium ..	R	651	57	11,4	11,0 Wollaston; 11,2 Cloud.
Sélénium..	Se	495	115	4,30	4,30, 4,32 Berzelius; 4,31 Boullay.
Sodium....	Na	291	292	0,99	0,97 Gay-Lussac et Thenard.
Soufre.....	S	201	101	1,99	1,99, 2,05 Karsten; 1,99 Breithaupt.
Titane.....	T	304	5	5,33	5,3 Wollaston; 5,28 Karsten.
Tungstène.	W	1183	69	17,1	17,2 Allan et Aiken; 17,4 Bucholz.
Zinc.......	Zn	403	58	6,95	6,92 Karsten; 6,86, 7,21 Berzelius.

Nous retrouvons dans ce tableau plusieurs des résultats obtenus par M. Dumas, puisque les métaux peuvent être divisés en différents groupes, ayant chacun le même volume spécifique. Voici ces groupes :

1° Le brome, le chlore, le cyanogène et l'iode;

2° Le chrôme, le molybdène et le tungstène;

3° Le cobalt, le cuivre, le fer, le manganèse et le nickel;

4° L'iridium, l'osmium, le palladium, le platine et le rhodium;

5° Le volume spécifique de l'argent est double de celui de l'or;

6° Le volume spécifique du potassium est double également de celui du sodium. En partant de l'égalité des volumes dans chaque groupe et du rapport du volume d'un groupe à l'autre, on peut calculer les densités.

On voit dans le tableau précédent, que les densités calculées et les densités observées sont les mêmes; les différences sont si faibles qu'elles peuvent être attribuées à des erreurs d'expérience. Indiquons les principes sur lesquels M. Kopp s'appuie pour calculer les densités des combinaisons.

Soient A et B les poids atomiques de deux substances qui entrent dans une combinaison, a et b les densités observées, on aura $\alpha = \frac{A}{b}$, $6 = \frac{D}{b}$ pour les volumes spécifiques primitifs des parties constituantes.

Si c est la densité de la combinaison, son poids atomique sera égal à $A + B$; on aura pour son volume spécifique

$$\gamma = \frac{A + B}{c}.$$

γ sera égal à $\alpha + 6$ toutes les fois qu'il ne se formera ni contraction ni dilatation pendant la formation de la combinaison; mais cette condition est rarement remplie. D'un autre côté, quand il y a variation dans le volume spécifique, on ignore *à priori* de quel côté a eu lieu cette variation; c'est-à-dire qu'on ne sait pas quelle est celle des parties constituantes qui s'est contractée ou dilatée. On a donc à résoudre une équation indéterminée. Voici les vues théoriques qui ont guidé M. Kopp pour arriver à connaître ce qui se passe dans cette circonstance; nous les rapportons textuellement:

« Une partie constituante peut entrer dans une combinaison sans qu'aucune variation de son volume spécifique soit nécessaire, toutes les fois que le volume spécifique de la combinaison est plus grand que celui de la partie constituante dans l'état isolé. Le plus simple consiste donc à chercher quels sont les résultats que l'on obtient, en supposant que l'une des parties constituantes soit entrée dans la combinaison avec son volume spécifique primitif. M. Schrœder a découvert que l'on obtient souvent le même reste, comme volume spécifique cherché de la partie constituante commune, en soustrayant du volume spécifique des combinaisons le volume spécifique primitif des parties constituantes correspondantes. Par exemple, les volumes spécifiques observés de CdO, CuO, HgO, PbO, ZnO, surpassent tous du même nombre les volumes spécifiques primitifs de Cd, Cu, Hg, Pb, Zn. Ainsi, en admettant que, dans les combinaisons analogues, les

parties constituantes correspondantes sont contenues avec leur volume spécifique primitif, il suffit d'une seule supposition pour le volume spécifique de la partie constituante commune, pour expliquer la formation du volume spécifique de toutes les combinaisons. En soustrayant du volume spécifique de plusieurs combinaisons analogues le volume spécifique primitif du métal contenu, on arrive presque toujours au même reste (qui doit être considéré comme le volume spécifique de la partie constituante commune), si le métal contenu dans la combinaison est un des métaux antimoine, argent, bismuth, cadmium, cobalt, cuivre, étain, fer, manganèse, mercure, molybdène, nickel, or, platine, plomb, titane, tungstène, zinc. Ce qui me porte à supposer *que ces métaux entrent toujours en combinaison sans altération du volume spécifique primitif.* Par là, en même temps, on apprend quel nombre on doit supposer comme le volume spécifique pour la partie constituante commune contenue dans des combinaisons analogues de ces métaux. Au contraire, dans les combinaisons d'autres métaux (barium, calcium, magnesium, potassium, sodium, strontium, etc.), que l'on a aussi depuis longtemps distingués des précédents, on ne peut nullement admettre que le métal y soit contenu avec son volume spécifique primitif; car celui-ci est autant qu'on le sait toujours plus grand que le volume spécifique de la combinaison. Pour déterminer quel est le volume spécifique que l'on doit supposer pour ces métaux entrés en combinaison, le plus simple consiste à supposer le volume spécifique de la partie constituante commune le même dans les combinaisons des métaux antimoine, argent, etc., que dans les combinaisons des métaux barium, potassium, etc.; de supposer, de plus, *que le volume spécifique adopté hypothétiquement pour un de ces derniers métaux est le même dans toutes les combinaisons analogues de ce métal.* C'est ainsi que j'ai déterminé la constitution du volume spécifique pour les combinaisons les mieux étudiées. Je commencerai le développement de ces idées sur la constitution des corps solides ou fluides d'après les volumes, en démontrant la constitution des sels, parce qu'ainsi nous pourrons considérer plusieurs classes de combinaisons analogues. Dans cette démonstration, je prendrai pour base la théorie des hydracides, avancée d'abord par Davy, défendue par Dulong, et plus recemment par M. Liebig. Admettons les suppositions suivantes :

« Tout métal est contenu dans les sels qu'il peut former, avec le même volume atomique, savoir :

« Quelques-uns, antimoine, argent..., zinc, avec leurs volumes spécifiques primitifs, tels qu'ils ont été donnés plus haut.

« Quelques-uns, barium, potassium, etc., avec un autre volume spécifique primitif ; nous supposons pour ces métaux contenus dans des sels, les volumes spécifiques suivants :

Ammonium est contenu dans ses sels avec le volume spécifique			Am = 218
Barium	—	—	Ba = 143
Calcium	—	—	Ca = 60
Magnésium	—	—	Mg = 40
Potassium	—	—	K = 234
Sodium	—	—	Na = 130
Strontium	—	—	Sr = 108

Passons maintenant à la constitution des sels. Pour expliquer la densité des *carbonates*, on suppose que le radical CO_3 entre dans ses combinaisons avec le volume spécifique 151. En combinant cette supposition avec les volumes spécifiques des métaux contenus dans des sels, tels que l'on vient de les déterminer, on obtient la constitution du volume spécifique des carbonates, et l'on arrive aux densités calculées suivantes :

CARBONATES.	POIDS ATOMIQUE.	FORMULE.	VOLUME SPÉCIFIQUE calculé.	DENSITÉ CALCULÉE.	DENSITÉ OBSERVÉE.
Argent.....	1728	$Ag + CO_3$	130+151 =281	6,15	6,08 Karsten.
Cadmium..	1073	$Cd + CO_3$	81+151 =232	4,63	4,42 Herapath ; 4,49 Karsten.
Fer.. ...	716	$Fe + CO_3$	44+151 =195	3,67	3,83 Mohs ; 3,67 Neumann.
Manganèse.	722	$Mn + CO_3$	44+151 =195	3,70	3,55, 3,59 Mohs.
Plomb.....	1670	$Pb + CO_3$	114+151 =265	6,30	6,43 Karsten ; 6,47 Breithaupt.
Zinc.......	779	$Zn + CO_3$	58+151 =209	3,73	4,44 Mohs ; 4,4 , 4,5 Neumann.
Baryte.....	1233	$Ba + CO_3$	143+151 =294	4,19	4,30 Karsten, 4,24 Breithaupt ; 4,30 Mohs.
Chaux.....	632	$Ca + CO_3$	60+151 =211	3,00	Arragonite 3,00 Breithaupt ; 2,93 Mohs. Spath calcaire 2,70 Karsten ; 2,72 Beudant.
Magnésie..	534	$Mg + CO_3$	40+151 =191	2,80	2,81 Breithaupt ; 3,00, 3,11 Mohs ; 2,88, 2,97 Neumann.
Potasse....	866	$K + CO_3$	234+151 =385	2,25	2,26 Karsten.
Soude......	667	$Na + CO_3$	130+151 =281	2,37	2,47 Karsten.
Strontiane.	923	$Sr + CO_3$	108+151 =259	3,56	3,60 Mohs ; 3,62 Karsten.
Dolomite..	1166	$Mg + CO_3$ $Ca + CO_3$	40+151 60+151 } =402	2,90	2,88 Mohs.
Mésiline...	1250	$Mg + CO_3$ $Se + CO_3$	40+151 44+151 } =386	3,24	3,35 Mohs.

La supposition que M. Kopp a faite pour le volume spécifique CO_3 est justifiée par l'accord qui règne entre les résultats du calcul et ceux de l'observation. Il n'y a que la densité calculée du sulfate de zinc qui soit différente de celle obtenue par l'observation ; ce qui exigera qu'on fasse une seconde supposition pour le volume spécifique de CO_3.

Pour les *nitrates*, M. Kopp suppose que le volume spécifique du radical $N_2O_6 = 358$; cette supposition explique la densité de tous les nitrates qui ont été examinés en effet :

NITRATES.	POIDS ATOMIQUE.	FORMULE.	VOLUME SPÉCIFIQUE calculé.	DENSITÉ CALCULÉE.	DENSITÉ OBSERVÉE.
Argent.......	2129	$Ag+N_2O_6$	130+358=488	4,36	4,36 Karsten.
Plomb........	2071	$Pb+N_2O_6$	114+358=472	4,40	4,40 Karsten ; 4,77 Breithaupt ; 4,34 Kopp.
Ammoniaque.	1004	$Am+N_2O_6$	218+358=576	1,74	1,74 Kopp.
Baryte........	1634	$Ba+N_2O_6$	143+358=501	3,20	3,19 Karsten.
Potasse.......	1267	$K+N_2O_6$	234+358=592	2,14	2,10 Karsten; 2,06 Kopp.
Soude........	1068	$Na+N_2O_6$	130+358=488	2,19	2,19 Marx ; 2,20 Kopp ; 2,26 Karsten.
Strontiane....	1324	$Sr+N_2O_6$	108+358=466	2,84	2,89 Karsten.

La densité de plusieurs *sulfates* porte à supposer que le radical SO_4 y est contenu avec le volume spécifique 236. Voici les résultats calculés d'après cette supposition, et comparés aux observations :

SULFATES	POIDS ATOMIQUE.	FORMULE.	VOLUME SPÉCIFIQUE calculé.	DENSITÉ CALCULÉE.	DENSITÉ OBSERVÉE.
Argent.....	1953	$Ag+SO_4$	130+236=366	5,34	5,34 Karsten.
Cuivre.....	997	$Cu+SO_4$	44+236=280	3,56	3,53 Karsten.
Zinc.......	1004	$Zn+SO_4$	58+236=294	3,42	3,40 Karsten.
Chaux.....	857	$Ca+SO_4$	60+236=296	2,90	2,96 Neumann ; 2,93 Karsten.
Magnésie ..	759	$Mg+SO_4$	40+236=276	2,75	2,61 Karsten.
Soude.....	892	$Na+SO_4$	130+236=366	2,44	2,46 Mohs ; 2,63 Karsten.

La densité de quelques sulfates ne peut être expliquée dans la sup-

position où le volume spécifique du radical SO_3 serait égal à 236. M. Kopp pense qu'il y a deux modifications de sulfates qui n'ont pas la même constitution d'après les volumes. En effet, dans la première de ces modifications, le radical SO_4 est contenu dans la densité avec un volume spécifique égal à 236; dans la seconde, il doit l'être avec un volume spécifique égal à 186. Dans cette dernière modification se trouvent compris les sulfates de plomb, de baryte, de potasse et de strontiane.

M. Kopp s'est livré au même examen pour les chromates, les tungstates et les chlorures, avec un égal succès.

Pour les chromates, il faut supposer le volume spécifique de $CRO_3 = 228$; pour les tungstates, celui de $WO_3 = 244$. Pour les chlorures, il y a deux modifications; dans l'une, il faut supposer que le radical Cl_2 a un volume spécifique égal à 196 : cette modification comprend les chlorures d'argent, de plomb, de baryte et de sodium; dans la seconde modification, il faut supposer le volume spécifique du radical Cl_2 égal à 245.

En continuant ainsi, on parvient à expliquer la densité de presque tous les sels connus, à l'aide d'un petit nombre de suppositions. M. Kopp s'est occupé ensuite de la constitution du volume spécifique des oxydes, et en premier lieu, de ceux que l'on suppose contenus dans leurs combinaisons avec leur volume spécifique primitif. En supposant le volume spécifique de l'oxygène contenu égal à 32, on peut expliquer la densité des oxydes qui appartiennent aux métaux suivants : antimoine, bismuth, cadmium, cobalt, cuivre, étain, fer, manganèse, mercure, molybdène, plomb, titane, zinc. Il y a désaccord avec le calcul seulement pour les protoxydes d'étain et de manganèse, l'oxyde de molybdène et le peroxyde de plomb, composés pour lesquels les expériences ont été faites depuis longtemps.

Les oxydes d'antimoine, d'étain et de chrôme, exigent que l'on prenne 64 pour le volume spécifique de l'oxygène.

Enfin, il existe d'autres oxydes, tels que 2 Cu,O, 2 Hg,O, Ag, O, qui exigent que l'on prenne 64 pour volume spécifique de l'oxygène.

M. Kopp a expliqué de la même manière la densité des combinaisons du soufre, de l'arsenic, etc., avec les métaux.

La méthode à l'aide de laquelle on a déterminé le volume spécifique des corps et qui a servi à trouver les lois que nous venons d'exposer, n'est pas à l'abri de toute objection. En effet, on a pris pour ce volume le quotient du poids atomique par la densité; mais comme celle-ci varie avec la température, ce quotient subit des variations correspondantes, de sorte que l'on n'a pas le volume spécifique absolu.

Cependant, si les variations de température dans des limites assez étendues ne changeaient pas assez la densité des corps pour apporter des différences notables dans la valeur du volume spécifique, il s'ensuivrait que les déterminations obtenues différeraient peu de celles que l'on aurait à la limite, c'est-à-dire à la température où les molécules des corps cessent de se rapprocher d'une manière appréciable à nos instruments. L'une de ces déterminations faite à une température convenable pourrait donc être prise pour la valeur approchée du volume spécifique. Voyons pour cela les changements qui s'opèrent dans la densité des corps; dans les métaux, par exemple, quand on fait varier leur température. Le plomb, à la température de 10° environ, a une densité égale à 11,3523; sa dilatation cubique de 0 à 100° étant de $\frac{3}{351}$, sa densité à 30° sera donc égale à 11,333, c'est-à-dire qu'elle différera de la précédente de $\frac{19}{1000}$. Ainsi le volume spécifique du plomb qui, dans le premier cas, était de 114,03, sera, dans le second, de 114,22. Le cuivre a pour densité à la même température, 8,7880; sa dilatation de 0 à 100° est de $\frac{3}{524}$; par conséquent, à 30°, sa densité sera égale à 8,778, laquelle différera de la précédente de $\frac{1}{100}$. Dans le premier cas, le volume spécifique est de 45,02; dans le second, de 45,09.

Nous voyons que dans les métaux la différence entre les volumes spécifiques à des températures de 10 à 30° n'est pas assez grande pour empêcher qu'on ne prenne, comme valeur approchée du volume spécifique, une de celles que l'on a obtenues. Dans les substances mauvaises conductrices de la chaleur, l'erreur que l'on commet est encore moins grande, en prenant pour volume spécifique la valeur obtenue à la température ordinaire. En effet, prenons pour exemple le spath d'Islande; quand on fait varier sa température de 0 à 100°, on trouve que la densité varie dans la proportion de 1,00196 à 1, d'où l'on conclut que le volume spécifique passe de 232,36 à 232,80, différence qui porte sur les dixièmes. On voit donc qu'en prenant la densité à de basses températures, on peut obtenir, pour le volume spécifique, une valeur peu éloignée de celle qu'on aurait à la limite. Ainsi donc, bien que l'on n'ait pas des valeurs rigoureusement exactes, néanmoins on peut apercevoir les lois précédemment indiquées dans les résultats de M. Kopp, lois qui régissent la constitution des combinaisons par les volumes.

La constitution des combinaisons solides ou liquides d'après les volumes, envisagée sous le point de vue de M. Kopp, nous servira à circonscrire dans ses justes limites la théorie de l'isomorphisme

dont nous parlerons bientôt ; mais en attendant, nous ferons remarquer que les suppositions d'où il part pour calculer la densité des combinaisons chimiques, solides ou liquides, conduisent à des résultats tellement identiques avec ceux de l'observation, qu'on ne saurait se dispenser de les prendre en considération. Au surplus, nous y reviendrons en exposant l'isomorphisme.

Des théories cristallo-atomiques.

La combinaison ayant lieu en proportions définies par atomes, et non par fractions d'atome, il s'agit de montrer comment on conçoit que ces atomes, en leur supposant une forme sphérique, puissent donner naissance, par leur groupement, à des molécules dont l'arrangement régulier produit des formes géométriques appelées *cristaux*. On peut imaginer bien des théories pour expliquer de semblables groupements, mais on ne doit attacher de l'importance qu'à celles qui s'appuient sur les résultats de l'analyse chimique, et les propriétés physiques des corps résultant de ces groupements.

M. Ampère a suivi le premier cette marche dans sa théorie cristallo-atomique, qui a l'avantage, tout en expliquant les formes cristallines des corps, de faire connaître, en raison des conditions auxquelles sont assujetties ces formes, si une combinaison est possible ou non. Cette théorie est encore basée sur ce principe, que les molécules des corps étant tenues, par l'action des forces attractives et répulsives, à des distances infiniment grandes relativement à leurs dimensions, leur forme ne peut avoir aucune influence sur les propriétés de ces corps ; celles-ci ne devant, par conséquent, dépendre que du nombre et du groupement des molécules.

Voici comment a raisonné M. Ampère : Les molécules sont formées de particules élémentaires, et comme tout espace a au moins trois dimensions, il est nécessaire que chacune d'elles soit formée au moins de quatre particules, attendu que pour circonscrire un espace, il faut au moins quatre plans passant chacun par les centres de gravité de trois de ces particules. Dans les cas où les molécules renferment un plus grand nombre de particules ou d'atomes, les plans qui limitent leur volume passent chacun par les centres de gravité de trois atomes, et laissent d'un même côté tous les autres atomes, sans quoi il y aurait des angles rentrants dans les cristaux. On peut ainsi former des polyèdres qui représentent les molécules des corps. Passons aux applications.

Dans les gaz simples ou composés, les molécules sont tenues par

la force expansive de la chaleur à des distances beaucoup plus grandes que celles où l'affinité et la cohésiou exercent leur action. Ces distances ne doivent donc dépendre que de la température et de la pression ; d'où il suit qu'à des températures et à des pressions égales, les molécules de tous les gaz sont placées à même distance, et que leur volume doit être proportionnel à celui des gaz ; mais comme il arrive que des gaz ne fournissent dans les combinaisons qu'un demi-volume, et que l'on ne saurait admettre la divisibilité des particules ou atomes, M. Ampère suppose, avec raison, que les molécules des gaz simples, tels que l'oxygène, l'hydrogène, l'azote, sont composées d'un nombre pair suffisant d'atomes pour que toutes les combinaisons connues satisfassent à ces conditions. La supposition la plus simple est d'admettre que les molécules de ces gaz sont composées de quatre atomes ; par conséquent, la molécule de gaz nitreux serait formée de deux particules d'oxygène et deux atomes d'azote ; celle de gaz oxyde d'azote, de quatre atomes d'azote et deux d'oxygène ; celle de la vapeur d'eau, de quatre d'hydrogène et deux d'oxygène ; celle du gaz ammoniacal, de six d'hydrogène et deux d'azote. Pour la molécule de chlore, on ne pourrait expliquer ses combinaisons qu'en admettant qu'elle soit composée de huit atomes, ainsi de suite. Pour grouper quatre, six, douze atomes, etc., de manière à former le tétraèdre, l'octaèdre, le parallélipipède et le prisme, le dodécaèdre rhomboïdal, ou raisonne de la manière suivante :

Prenons deux atomes réunis par une ligne et deux autres atomes disposés de la même manière dans le même plan, de manière que les deux lignes se coupent en deux parties égales et à angle droit. Si on écarte ces deux lignes en les tenant toujours dans le même plan dans une position parallèle, on aura un tétraèdre régulier quand les deux lignes, étant égales, auront été écartées l'une de l'autre à une distance qui soit à la longueur $: : 1 : \sqrt{2}$. Si l'on conçoit maintenant trois atomes joints par des lignes formant un triangle quelconque, et qu'on place dans le même plan un autre triangle égal au premier dont la situation soit telle que les deux triangles aient leur centre de gravité au même point et leurs côtés égaux respectivement parallèles à leur position primitive, on obtient les six sommets d'un octaèdre, qui ne sera régulier que daus le cas où les triangles seront équilatéraux, et qu'on les aura écartés perpendiculairement à leur plan d'une quantité qui soit à leurs côtés

$$: : \sqrt{2} : \sqrt{3}.$$

En suivant la même marche, M. Ampère a montré qu'un parallélipipède est formé de la réunion de deux tétraèdres : si ceux-ci sont réguliers, le parallélipipède devient un cube ; qu'un prisme hexaèdre peut provenir de la réunion de deux octaèdres, et qu'en combinant ensemble deux tétraèdres et un octaèdre, on obtient un dodécaèdre ; que l'octaèdre réuni d'une certaine manière avec le tétraèdre donne un hexadécaèdre formé de quatre faces triangulaires équilatérales et douze isocèles ; que deux octaèdres réunis en prisme hexaèdre peuvent se joindre à deux tétraèdres formant un cube, et donner un polyèdre à vingt sommets composé de trente faces, savoir : six parallélogrammes rectangles et vingt-quatre triangles isocèles. Ainsi, en continuant ce mode de combinaison de divers solides, M. Ampère est parvenu à obtenir des polyèdres de cinquante-quatre, de soixante-six, de quatre-vingts faces, et même au delà, qui représentent les divers arrangements des atomes de tous les corps dont le nombre est déterminé par l'expérience. Par cette détermination, on a effectivement la figure polyédrique qui correspond à la molécule ; mais est-ce bien là la figure de la molécule ? Quelle preuve en donne M. Ampère ? aucune. Il n'a pas cherché si le système cristallin d'une combinaison s'accordait avec le principe de la molécule constitutive déterminé par ses vues théoriques. Néanmoins, en suivant les déductions de cette théorie, on trouve qu'en comparant les combinaisons de l'hydrogène et de l'oxygène avec différents corps, à l'exception du chlore et du soufre, dont les combinaisons avec l'hydrogène jouent le rôle d'acide, on trouve qu'une même quantité d'un corps susceptible de s'unir à l'hydrogène s'y combine de manière qu'en général il y a dans chaque partie du composé quatre atomes d'hydrogène de plus qu'il n'y a d'atomes d'oxygène dans la combinaison correspondante du même corps avec ce dernier gaz ; comme moyen de vérification de la théorie, on peut, la composition des corps étant connue, déterminer les rapports des quantités d'acide, de base, et même d'eau de cristallisation qui doivent se trouver dans les sels acides, neutres, sursaturés d'une même espèce, ou quand on connaît les formes représentatives des molécules de l'acide et de la base. Si l'on considère, par exemple, la forme des particules de l'acide sulfurique, forme déterminée par le nombre d'atomes qui entrent dans sa composition conformément aux vues précédentes, on trouve, d'après l'expérience, que la plupart des sulfates sursaturés doivent contenir trois fois plus de base que les sulfates neutres, et que la quantité d'acide sulfurique est, dans les sulfates acides, le double de celle

des sulfates neutres, tandis que l'acide sulfureux, d'après la forme représentative de ses molécules, peut former, avec l'ammoniaque, un sel acide où il entre en plus grande quantité que dans le sulfate neutre. On voit par là que les considérations géométriques de M. Ampère, basées sur la composition atomique des corps, ont des moyens de vérification auxquels peuvent s'exercer ceux qu'intéresse ce genre de recherches. Les vues que nous venons d'exposer sont certainement très-ingénieuses et de nature à être prises en considération, puisqu'elles reposent sur la composition des corps en proportions atomiques; mais elles ont néanmoins l'inconvénient d'admettre dans la science, pour forme des molécules, des polyèdres très-compliqués, dont il est difficile, sans un examen assez approfondi, de saisir la construction.

D'un autre côté, M. Ampère s'est attaché plutôt à satisfaire à la composition atomique qu'à vérifier si ses formes moléculaires étaient d'accord avec celles des molécules des corps que l'on peut obtenir cristallisés. C'est pour parer à ces deux inconvénients que M. Gaudin, tout en évitant, comme M. Ampère, les demi-atomes, et en satisfaisant à la loi de symétrie et à la composition atomique, a cherché à représenter les formes des molécules par des polyèdres moins compliqués que ceux dont il a été question précédemment, et en s'attachant à démontrer que, dans les cas de vérification *possibles*, ces formes s'accordaient avec celles de la nature. Ces modifications à la théorie de Ampère méritent d'être prises en considération.

Voici les principes qui ont servi de base à M. Gaudin pour le groupement des particules:

1° Les atomes ne viennent jamais au contact.

2° Leur distance varie suivant les oscillations qu'ils exécutent sans cesse.

3° Dans les combinaisons, il y a pêle-mêle général des atomes.

Néanmoins, les atomes doués d'un fort pouvoir électro-chimique occupent dans la molécule constitutive les positions principales; ainsi, le potassium, etc., le plomb, etc., et jamais l'hydrogène, l'azote, etc., forment le noyau de la molécule.

4° Lorsque plusieurs atomes identiques se groupent dans un même plan autour d'un autre atome, c'est toujours au nombre de 2, 3, 4, 6, ou 12; les nombres 5, 7, 9, etc., sont exclus. Les plus usités sont 4, 6 et 8. Dans le cas où l'atome principal est celui d'un métal et les autres atomes ceux d'oxygène, on a, en les joignant par des lignes droites, des polyèdres de 4, 6 et 8 côtés.

Voici quelques exemples de groupement. Un volume de chlore, en se combinant avec un volume d'hydrogène, donne naissance à deux volumes de gaz acide hydrochlorique. Il faut donc qu'une particule de chlore, en se combinant avec une particule d'hydrogène, produise deux particules de gaz acide hydrochlorique. Or, cette combinaison ne saurait s'effectuer, d'après M. Gaudin, qu'en admettant que les particules soient susceptibles de se diviser en deux. Il faut donc admettre, pour satisfaire à la loi de composition, que la particule soit composée d'un nombre pair d'atomes, comme M. Ampère l'a indiqué. M. Gaudin a fixé ce nombre à deux pour les particules de chlore et d'hydrogène.

De même, un volume de gaz oxygène, en se combinant avec deux volumes de gaz hydrogène, donne deux volumes de vapeur d'eau. Il faut donc que chaque atome d'oxygène s'approprie deux atomes d'hydrogène. La particule d'eau sera donc composée de trois atomes, ce qui exige que la particule d'oxygène soit biatomique. C'est par des considérations du même genre que l'on trouve que les particules du carbone et des métaux sont atomiques, celles du phosphore à l'état de vapeur tétratomiques ; celles du soufre hexatomiques.

Nous ne pousserons pas plus loin les conséquences que l'on peut tirer des vues théoriques de M. Ampère, modifiées par M. Gaudin, attendu que nous avons voulu seulement montrer les efforts que l'on avait faits pour arriver à la connaissance de la forme des molécules, en s'appuyant sur la composition atomique, la loi de symétrie et même la forme cristalline de quelques corps et indiquer la marche à suivre dans des recherches de ce genre. Quoique l'on doive se mettre en garde contre les déductions que l'on pourrait tirer de la théorie que nous venons d'exposer, néanmoins, comme elle est basée sur des faits, qu'elle les embrasse presque tous, nous avons dû lui donner place dans ce traité.

D'après ce que nous venons de voir, on conçoit que l'on puisse grouper les atomes de bien des manières pour en former des molécules intégrantes, et arriver ensuite aux formes cristallines. M. Baudrimont a fait aussi un essai de ce genre ; nous allons rapporter sa manière de voir, fondée également sur les principes de M. Ampère.

Lorsque les atomes s'arrangent pour former une molécule intégrante, ils se groupent régulièrement. Dès que les molécules intégrantes sont assez écartées les unes des autres, pour se mouvoir librement et se rapprocher lentement, il en résulte des composés cristallisés ; d'où il suit que les formes de ces derniers doi-

vent dépendre du nombre et de l'arrangement des atomes; par conséquent la nature des atomes peut changer sans que celle des molécules puisse varier. Prenons pour exemple l'iodure de potassium dont la formule est I^2K ; ce composé cristallise en cube. Le chlorure de potassium, qui a une formule semblable Cl^2K, cristallise de la même manière. Les carbonates, dont la formule est la même, cristallisent dans le système rhomboédrique; seulement, les angles du rhomboèdre présentent quelques différences. Voyons maintenant, en suivant toujours la méthode de M. Baudrimont, comment, la composition et la forme cristalline d'une combinaison étant connues, les atomes doivent être groupés pour donner naissance à cette forme cristalline. Prenons pour exemple le sulfure de plomb qui cristallise dans le système cubique, et dont la formule est $S^1Pl.$; or, deux atomes égaux ne peuvent former un cube, puisqu'il en faut au moins huit, quatre de chaque espèce, disposés sur chacune des faces de la manière suivante : $\begin{smallmatrix} S & P \\ P & S \end{smallmatrix}$; dès lors la molécule se compose de quatre atomes. Si l'on considère le sel marin, Cl^2Na, il faut prendre un nombre d'atomes suffisant pour former un cube; or, la supposition la plus simple est d'admettre neuf atomes de ce chlorure, savoir, neuf de sodium et dix-huit de chlore. Ces éléments sont alors disposés de la manière suivante pour la première tranche :

Na. Cl. Na.
Cl. Cl. Cl.
Na. Cl. Na.

La troisième tranche est comme la première. Cette méthode qui paraît assez rationnelle, montre que les formules chimiques n'expriment seulement que le rapport du nombre des atomes. Prenons un autre exemple dans la chimie organique. Le camphre, qui cristallise dans le système cubique, a pour formule $C^{10}H^{16}O$; or, comme la somme des atomes est égale à vingt-sept, le nombre de ces atomes est précisément celui qui convient pour former le cube. Ces exemples suffisent pour donner une idée de la méthode de M. Baudrimont.

CHAPITRE II.

Structure des corps inorganisés.

I *Considérations générales.*

Les corps inorganisés se présentent à nous, tantôt sous la forme polyédrique ou de cristaux, tantôt à l'état amorphe, qui est lui-même variable en raison de l'arrangement plus ou moins irrégulier des molécules; ils affectent la forme de cristaux, quand ils passent lentement de l'état liquide ou gazeux à l'état solide. Les cristaux sont des solides à faces planes, dont le nombre est plus ou moins considérable, mais qui peuvent toujours se rapporter à des cristaux simples appelés formes primitives. Deux surfaces planes se rencontrent suivant des lignes droites appelées arêtes; les pointes où aboutissent les arêtes sont les sommets des cristaux.

Linné est le premier qui ait annoncé que les cristaux étaient le résultat de forces constantes, et que leur étude devait être prise en considération dans la description des substances. Romé de l'Isle s'empara de cette idée, et décrivit, dans un ouvrage publié en 1772, un grand nombre de cristaux, la plupart inconnus, en donnant la mesure de leurs angles; il fit en même temps connaître ce fait fondamental, que ces angles étaient les mêmes dans la même variété, et essaya de lier entre elles les diverses formes cristallines d'un même minéral.

Bergman et Haüy observèrent en même temps la cassure lameileuse de quelques cristaux, et les directions constantes qu'elle suit dans tous ceux qui appartiennent à une même variété. Le premier se borna à en tirer quelques inductions relatives à la structure des cristaux, tandis que le second étendit ce résultat à toutes les espèces susceptibles de le présenter, et établit une théorie au moyen de laquelle il fit dépendre toutes les formes cristallines de la même espèce d'une forme primitive, ce qui lui permit de mesurer les angles avec plus d'exactitude qu'on ne l'avait fait jusque-là. Ce principe de la forme primitive n'a pas toute la généralité que lui supposait Haüy, qui, néanmoins, est regardé comme le fondateur de la théorie cristallographi-

que; mais avant de la développer, exposons les propriétés générales des cristaux.

A l'exception du tétraèdre, les cristaux ont ordinairement leurs faces parallèles deux à deux. Les plans qui composent les cristaux sont, en général, ordonnés symétriquement, soit tous ensemble, soit partiellement par rapport à une ligne appelée axe. Cette ligne passe toujours par le centre du cristal et par deux angles opposés, ou par les centres de deux faces opposées, ou bien encore par les centres de deux arêtes opposées. Un grand nombre de substances cristallisées jouissent de la propriété de se laisser diviser ou cliver dans des directions planes avec plus ou moins de facilité. Souvent même on ne fait que soupçonner le clivage à l'aspect des stries ou lignes tracées sur les faces des cristaux. Ces indices sont même quelquefois si faibles, qu'on ne peut les déterminer qu'au moyen de reflets produits, quand on expose le cristal à une vive lumière. Pour effectuer le clivage, on se sert d'un instrument tranchant que l'on incline dans le sens présumé de la lame que l'on veut enlever, et sur lequel on frappe un coup sec avec un marteau.

Un cristal présente ordinairement plusieurs clivages : l'antimoine fondu en a jusqu'à dix ; il y a des cristaux qui n'en ont qu'un ou deux. Il est des clivages qui tous ont le même degré de netteté dans tous les sens, comme la chaux fluatée et la galène (plomb sulfuré) en sont des exemples. La première en a quatre parallèles aux faces d'un octaèdre régulier, et la seconde trois dans des directions rectangulaires. Ces clivages sont une conséquence de la forme des cristaux ; car il n'y a pas de motif pour que l'un d'eux soit plus facile dans un sens que dans un autre. Dans les substances dont le système cristallin ne dépend pas de l'octaèdre régulier, du cube et du rhomboèdre, les clivages n'ont pas la même netteté dans différents sens. Ainsi, la chaux sulfatée, qui dérive d'un prisme rhomboïdal oblique, en a trois, dont un très-facile et deux autres beaucoup moins, qui laissent à découvert des faces dépourvues d'éclat. Dans les substances qui ont des clivages nombreux, comme la chaux carbonatée, on remarque souvent qu'ils sont partagés en ordres différents par rapport à leur degré de netteté. On observe d'abord, en effet, un clivage triple très-facile, et plusieurs autres, triples ou sextuples, qui le sont beaucoup moins. Ces derniers ont été appelés clivages surnuméraires par Haüy. La réunion des plans de clivage et les annotations relatives à leur netteté doivent être prises en considération par le physicien, car la réunion de ces plans constitue une forme géométrique intérieure constante, et les annotations mon-

trent que la force d'agrégation qui produit le groupement des molécules n'est pas la même dans les différents sens de clivage. Nous ajouterons que les différentes formes cristallines d'une substance appartenant au même système cristallin, sont toujours liées entre elles par des rapports symétriques, et que les divers solides formés de la réunion des clivages de différents ordres, ont entre eux des rapports géométriques analogues. On appelle *système cristallin* d'un minéral l'ensemble des lois symétriques principales auxquelles les différentes parties de ses formes cristallines paraissent assujetties.

Exposons les faits qui peuvent nous éclairer sur la structure des cristaux, abstraction faite de toute supposition, de toutes idées théoriques, sur le groupement ou l'arrangement des molécules auquel on rapporte les formes variées que présente souvent un même minéral.

Toutes les formes cristallines d'une même substance appartenant à un même système cristallin, peuvent être rapportées à une forme unique, appelée *forme primitive* par Haüy, et que l'on extrait la plupart du temps par le clivage ou un refroidissement brusque, ou que l'on peut déterminer par des considérations géométriques. Voici comment Haüy parvint à extraire la première fois, d'un cristal prismatique de chaux carbonatée, le rhomboèdre obtus, forme primitive de cette substance. Un cristal prismatique de chaux carbonatée (pl. I, fig. 1, 3), s'étant détaché par hasard d'un groupe, Haüy remarqua que la fracture qui s'était faite à l'endroit où le cristal tenait à ce groupe, avait laissé à découvert une face nette et polie *a b c d* qui remplaçait une des arêtes de la base. Il en conclut que l'on devait considérer cette face comme faite suivant un des joints naturels du cristal. Il reconnut encore que le plan de cette face était sensiblement incliné de la même quantité, tant sur la base du prisme que sur la face adjacente. Ayant produit de semblables clivages sur les arêtes des deux bases, il reconnut qu'il n'y en avait que trois, parmi les six dont ces bases se composaient, qui se prêtassent à cette opération, et encore ces six plans étaient parallèles deux à deux. En continuant la division jusqu'à ce que toutes les faces du prisme aient disparu, il obtint un rhomboèdre obtus *ss'* (pl. I, fig. 2), dont les faces, prises vers un même sommet, étaient inclinées d'environ 101°,5, c'est-à-dire que ce rhomboèdre était précisément celui que l'on obtient en clivant des lames de spath calcaire. On voit ce rhomboèdre inscrit dans le cristal prismatique (pl. I, fig. 3). Haüy conclut de cette observation (qu'il étendit à d'autres variétés plus ou moins complexes de chaux carbonatée), que toutes ces variétés renfermaient un noyau

absolument semblable à celui qu'il avait obtenu avec le prisme hexaèdre, noyau qui devait être considéré comme la forme primitive. Telles sont les bases de son système de cristallographie, dont il a suivi toutes les conséquences avec la plus grande sagacité ; mais avant d'indiquer quelles sont ces conséquences, nous allons décrire les moyens employés pour mesurer les angles plans et les angles qui déterminent les inclinaisons des faces, sans lesquels il ne serait pas possible de pénétrer profondément dans la constitution ou la structure des cristaux.

II. *Mesure des angles des cristaux.*

Pour mesurer les angles des cristaux, on se sert de divers instruments appelés *goniomètres.* Nous ne décrirons que les appareils de ce genre susceptibles d'une certaine précision, et les seuls, par conséquent, que l'on puisse adopter en physique. Nous ne dirons donc que deux mots du goniomètre, formé de deux lames d'acier réunies par un axe, autour duquel elles peuvent glisser au moyen de rainures, pour s'allonger et se raccourcir à volonté, et d'un rapporteur qui sert à mesurer l'angle des deux lames d'acier qui ont été appliquées chacune sur une des faces du cristal perpendiculairement à leur arête d'intersection. Cet appareil ne peut servir qu'à donner une mesure approximative des angles des grands cristaux. Le goniomètre fixe de M. Aldeman est le même que le précédent ; mais il donne des mesures plus précises, en raison des perfectionnements que son auteur lui a fait subir, lesquels consistent en ce que l'appareil est fixe ainsi que le cristal, ce qui rend les deux mains libres, et donne des moyens faciles de vérification.

Goniomètre d'Aldeman.—Un demi-cercle ABC (pl. I, fig. 4) est fixé sur une règle *ab*, soutenue par deux colonnes *pp :* le demi-cercle peut se mouvoir à droite et à gauche en passant dans les rainures *cc*, où se trouvent de petites roulettes destinées à adoucir le mouvement. Ce demi-cercle fixe en porte un autre *fg*, qui se meut au centre *o*, et qui est divisé en degrés; il est pourvu d'un nonius *hik*, qui se meut également au centre, mais en arrière, entre le centre et la règle, et que l'on peut placer en un endroit quelconque à l'aide d'une vis de pression *k*. On peut obtenir ainsi des minutes. L'alidade *lm* entraîne dans son mouvement le cercle *fg*. Le cristal dont on veut mesurer les angles est fixé avec de la cire sur une tige *q*, qui peut être élevée, abaissée, penchée en avant ou en arrière, ou tournée sur elle-même, suivant le besoin. Elle est supportée par un petit chariot *u*, qui entre à frottement et à queue d'aronde entre les petites tringles *ss*. La

pièce *tn* est la mire que l'on applique contre une des tringles *s*, lorsque le chariot est suffisamment tiré en avant, et qui permet de juger de la ligne d'intersection des deux faces dont on veut mesurer l'angle, ainsi que sa perpendicularité au plan du cercle. Quand on veut se servir de cet instrument, on assujettit le cristal à la tige *q*, et l'on s'assure par la mire, que l'on gouverne en conséquence, si l'arête d'intersection est parallèle aux bords *v*, cas auquel elle est perpendiculaire au plan du cercle. Si cette condition n'est pas remplie, on y obvie; en regardant ensuite par l'ouverture *x*, on lui donne une position horizontale. Cela fait, on pousse le chariot sur le cercle, on fait mouvoir l'alidade, et en même temps marcher la règle, jusqu'à ce que l'alidade s'applique exactement sur la face sans laisser aucun vide. Après quoi l'on amène le nonius jusqu'au bout du demi-cercle mobile où un petit taquet l'arrête exactement à zéro. On le fixe alors dans cet endroit au moyen d'une vis de pression. On retire le chariot en avant; on fait passer l'alidade dans l'autre sens; on repousse le chariot, et l'on procède à la coïncidence sur la seconde face. Cependant, le demi-cercle tourne d'une certaine quantité angulaire; la mesure de cet angle, qui est déterminée en degrés sur le limbe, et en minutes sur le nonius, donne la mesure de l'angle cherché. On obtient avec cet instrument des angles à trois ou quatre minutes près. Il a, de plus, l'avantage précieux de pouvoir être appliqué immédiatement à des cristaux à faces ternes, mais lisses. Il ne faut pas, quand on veut avoir des déterminations exactes, que les faces soient par trop petites, afin d'être assuré de la coïncidence de l'alidade avec elles; il peut servir encore à mesurer des angles plans et l'inclinaison d'une arête sur une face, et être employé comme goniomètre à réflexion.

Les meilleurs goniomètres sont ceux dits à réflexion; ils sont composés de cercles divisés, mobiles, munis de nonius et d'une tige perpendiculaire au plan du cercle également mobile, et à l'extrémité de laquelle on assujettit le cristal avec de la cire, de manière que l'arête de jonction soit verticale : le plan du cercle est horizontal.

Cette arête doit être placée au centre de l'alidade mobile; en avant du cercle, se trouve une petite lunette dans une position fixe; on fait tourner l'alidade jusqu'à ce qu'une des faces réfléchisse l'image d'une mire éloignée, et on marque le degré auquel elle répond. On continue ensuite à tourner jusqu'à ce que l'autre face vienne se placer de manière à réfléchir le même objet. Il est facile de prouver que l'angle dont on a tourné l'alidade est le supplément de l'angle compris entre les deux faces; il suffit de tracer une figure pour s'en rendre compte.

La condition à remplir pour avoir une mesure exacte, est de s'assurer que l'arête d'intersection soit perpendiculaire au plan du cercle. Il faut partir du principe, que l'image d'un objet vertical, réfléchie par un miroir vertical, donne une image verticale. En plaçant dans la lunette un fil vertical, on met l'instrument devant une fenêtre, d'où l'on puisse apercevoir au loin des tiges verticales quelconques, le cercle étant rendu horizontal, et l'on tourne le cristal jusqu'à ce qu'une de ses faces réfléchisse l'image de l'objet : quand celle-ci n'est pas verticale, elle ne coïncide pas alors avec le fil de la lunette, et l'on fait mouvoir le cristal sur son support, jusqu'à ce que cette condition soit remplie. On répète la même épreuve avec l'autre, et si l'on trouve dans les deux cas que l'image réfléchie soit verticale, on procède à la mesure de l'angle.

Goniomètre de Wollaston. — L'appareil de ce genre dont on fait usage le plus ordinairement, est celui imaginé par Wollaston. Il se compose d'un cercle de cuivre gradué, placé verticalement, muni d'un nonius, et mobile autour d'un axe horizontal. Cet axe est percé dans toute sa longueur pour laisser passer un autre axe muni, à son extrémité qui doit recevoir le cristal, de plusieurs pièces mobiles. Cet appareil est représenté pl. I, fig. 5. Avant de commencer l'expérience, on fixe le cercle à zéro, ou 180°. Le cristal est assujetti ensuite avec de la cire sur une petite plaque *a* ou à l'extrémité de la tige *ab*, de manière que l'arête soit perpendiculaire au plan du cercle, et suivant l'axe de rotation. On se place ensuite devant une fenêtre, en tenant le goniomètre de la main gauche par le pied, et de manière à voir plusieurs lignes horizontales, telles qu'une ligne de toit, une ligne de balcon, avec cette condition que le plan du cercle soit perpendiculaire à la face du bâtiment. On place ensuite l'œil le plus près possible du cristal, et l'on fait tourner l'axe intérieur au moyen de la virole *b*, de manière à amener une des faces dans une position telle, qu'elle réfléchisse la plus élevée des lignes horizontales. On continue à tourner lentement jusqu'à ce que l'œil aperçoive à la fois l'image réfléchie, et une des lignes inférieures vue alors directement. Quand les deux lignes coïncident, on est certain, d'après ce qui a été dit, que la face du cristal est horizontale; quand cette condition n'est pas remplie, on y remédie comme on l'a vu. On fait la même opération avec l'autre face, pour être bien assuré que le cristal est dans la position exigée. Alors, il ne faut plus toucher au cristal ni déranger l'instrument. Puis, on tourne le cristal au moyen de la virole *b*, jusqu'à ce qu'une des faces réfléchisse la ligne de mire su-

périeure, et la fasse coïncider avec la ligne inférieure; puis on fait tourner le cercle lui-même, au moyen de la virole *c*; le cristal est alors entraîné, et l'on ne s'arrête que lorsque l'image réfléchie de la mire supérieure coïncide avec la mire inférieure; l'angle décrit par le cristal est le supplément de l'angle qui mesure l'incidence des deux faces.

On ne peut mesurer avec cet appareil que de très-petits cristaux, attendu que l'œil n'étant point fixe, la distance des objets de mire n'étant pas ordinairement considérable, il faut, pour obtenir des résultats exacts, que les dimensions du cristal et la distance à l'œil puissent être considérées comme infiniment petites. On y trouve encore un avantage, car plus les cristaux sont petits, moins on a de chance pour trouver des macles, et plus aussi les faces approchent d'être planes. Cet appareil ne peut servir aux cristaux dont les faces ne sont pas miroitantes. On obvie à cet inconvénient quand les faces sont bien lisses, en appliquant dessus une couche très-légère de vernis. On a proposé aussi d'appliquer sur chaque face la moitié d'une lame de verre très-mince, et de l'y assujettir avec un peu d'huile de térébenthine épaissie. Dans ce cas, la lame de verre fait l'office d'un petit miroir parallèle à la face du cristal sur laquelle elle est collée. Il devient facile alors de mesurer l'inclinaison des faces au moyen des deux lames.

Le goniomètre de Wollaston donne des résultats à une demi-minute près; mais il est des cas où il est nécessaire de mesurer les angles à 10″ près, et même au-dessous. Dans ce cas, il faut rendre l'appareil fixe, et disposer les parties mobiles de manière à leur communiquer des mouvements doux; enfin, il faut transformer le goniomètre de Wollaston en un appareil de précision: c'est ce but que M. Mitscherlich a atteint avec l'appareil dont nous allons donner la description.

Goniomètre de Mitscherlich. — Nous avons vu précédemment que, pour avoir une mesure exacte de l'angle compris entre les deux faces d'un cristal, il est nécessaire que les deux faces du cristal soient parallèles à l'axe de rotation, que celui-ci se confonde avec l'axe du cristal, et que l'œil conserve une position invariable pendant toute la durée de l'expérience. On satisfait à la première condition au moyen d'un support à double mouvement porté par l'axe de rotation. C'est sur ce support qu'est fixé le cristal avec de la cire; la figure 6, pl. I, donne une idée complète de l'appareil. Un limbe vertical B porte à son centre un axe creux qui lui est perpendiculaire, et traversé par

un autre axe destiné à supporter le cristal, disposition semblable à celle adoptée par Wollaston. L'axe intérieur tourne, glisse dans l'axe creux sans que celui-ci cesse d'être fixe. Les deux axes peuvent être liés également d'une manière sûre. Une pince G est saisie entre une vis *d* et un ressort *c*. En serrant la pince au moyen de la vis *e*, on rend le limbe immobile et indépendant de l'axe intérieur. Le support du limbe porte un vernier fixe. Veut-on faire coïncider exactement les zéros du limbe et du vernier, on commence par amener le zéro du limbe aussi près que possible de l'index, on serre la pince G, et, au moyen de la vis *d*, on fait marcher cette pince, qui entraîne le limbe jusqu'à la parfaite coïncidence des deux zéros. On lit les divisions du limbe à l'aide d'une loupe *l* portée par une tige mobile. Une pince *f* invariablement fixée à l'axe intérieur sert à le lier à celui du limbe. Lorsque la pince *f* est serrée, la vis *k* sert à produire un mouvement micrométrique de rotation pour l'axe intérieur. Cet axe porte un appareil destiné à orienter le cristal au moyen de doubles mouvements combinés; le premier de ces mouvements doit amener le cristal sur l'axe de l'appareil. Il se compose d'une coulisse mobile parallèlement à la vis L, qui détermine son mouvement. Celle-ci porte une seconde coulisse, qui se meut dans une direction perpendiculaire au moyen de la vis *k*. Ce double mouvement suffit pour amener la fourchette qui supporte la pièce *m* en un point convenable pour que le cristal soit sur l'axe; mais il faut de plus que ses faces soient parallèles à cet axe; pour cela, cette fourchette porte à son extrémité antérieure une cavité demi-sphérique *xx*, où peut se mouvoir une demi-sphère *e*, munie d'une queue bifurquée qu'on voit passer dans le canal *v* qui traverse la calotte *xx*. Dans la bifurcation de cette queue passe une vis *r*, portée elle-même sur une fourchette M, dont la queue inclinée est traversée par une vis *s* perpendiculaire à la vis *r*. Au moyen de ces vis qui entraînent la queue de la demi-sphère mobile, on voit qu'on peut faire tourner celle-ci de manière que la section méridienne *t* pourra prendre diverses positions par rapport à l'axe. Cette demi-sphère porte un petit canal perpendiculaire à sa face *t*, dans lequel on introduit la queue *y* de la pince N; cette pince, qu'on serre au moyen d'une clef, porte le cristal, et est entraînée par le mouvement de la demi-sphère à laquelle elle demeure liée. Les deux vis *r* et *s* déterminent un double mouvement de rotation, et les deux vis *k* et L un double mouvement de translation. Il s'ensuit que l'on peut donner au cristal toutes les positions; les orientations qu'il peut recevoir n'ont d'autres limites que celles de l'amplitude des mou-

vements que permet la construction de l'appareil. Pour que l'œil vise dans une direction constante, le goniomètre porte une lunette H, mobile sur un axe parallèle à celui du limbe. Son support est fixé au moyen de deux vis *pp*, et peut se mouvoir parallèlement à l'axe, afin d'amener la lunette vis-à-vis du cristal. Deux fils croisés sur l'axe de la lunette assurent la direction constante du rayon visuel.

L'usage de cet appareil est entièrement le même que celui du goniomètre de Wollaston. Le limbe étant fixé à zéro, on oriente le cristal au moyen des doubles mouvements portés par l'axe intérieur. L'orientation est bonne, comme on l'a déjà vu, quand l'image d'une ligne réfléchie successivement sur les deux faces de l'angle qu'on mesure se projette sur une même ligne parallèle à la première. Quand cette coïncidence est obtenue pour une des faces à l'aide du mouvement micrométrique E, on serre la pince *f* et on desserre la pince *e* ; on fait tourner simultanément les deux axes, de manière à obtenir la même coïncidence pour l'autre face : on se sert alors du mouvement micrométrique *g*, après avoir serré de nouveau la pince *e* ; l'angle observé est celui des normales, et l'on obtient un angle à une demi-minute près. Ce goniomètre ne peut être employé que pour la mesure des angles de cristaux à faces très-miroitantes, parce que la lunette diminue beaucoup l'intensité de la lumière réfléchie.

Goniomètre de M. Babinet. — Ce goniomètre, qui nous reste à décrire, a l'avantage de porter avec lui sa mire, et dispense de le mettre dans une position fixe ; aussi, peut-on opérer en le tenant à la main ; la mire consiste en deux fils croisés placés au foyer d'une lentille. Les rayons qui partent de ces fils sortent parallèles, comme s'ils arrivaient d'un objet éloigné, et viennent tomber successivement sur les faces d'un prisme dont on veut déterminer les inclinaisons respectives. Voici les parties principales de cet appareil (pl. I, fig. 7), qui peut servir également à déterminer le pouvoir réfringent et l'angle de polarisation d'une substance ; mais pour l'instant, il ne sera pas question de ce double usage.

A B est un cercle divisé en demi-degrés, au-dessous duquel se trouve une poignée P pour observer à la main ; L L une lunette fixe, au foyer de l'objectif de laquelle sont placés deux fils croisés rectangulairement, dont l'un est plus gros que l'autre.

La lunette, composée de deux parties, dont l'une C D est mobile, peut s'allonger ou se raccourcir à volonté pour prendre le point de vue, et permet de mettre les deux fils croisés dans une position quelconque. L' L' est une autre lunette, composée également de deux

parties, et mobiles autour de l'axe du cercle. Au foyer de l'objectif se trouvent également deux fils croisés rectangulairement, mais de même diamètre. Cette lunette est munie d'un vernier $v'v'$ qu'elle transporte dans ses divers mouvements. Au centre du cercle se trouve un porte-objet composé de deux pièces mobiles autour de son axe, et dont les deux mouvements sont indépendants l'un de l'autre. La pièce inférieure est munie d'un vernier $v\ v$, et la supérieure est simplement une platine sur laquelle on fixe avec de la cire le cristal soumis à l'expérience. Quand on veut trouver l'angle compris entre les deux faces de cristal, on commence par fixer ce cristal sur le porte-objet, en rendant verticale la ligne d'intersection des deux faces; puis on dispose la lunette fixe pour que l'un des fils croisés soit aussi vertical. On fait tourner la seconde lunette de manière à voir l'image réfléchie de l'un des fils de la lunette fixe sur l'une des faces du cristal, et on l'amène à coïncider avec un des fils de la lunette mobile. Cette première opération étant faite, on lit sur le cercle les divisions correspondantes au vernier du porte-objet, que l'on tourne jusqu'à ce que la seconde face du cristal réfléchisse la mire de la lunette fixe, de manière à coïncider avec le fil de mire de la lunette mobile. On lit l'angle parcouru par le vernier du porte-objet, et l'angle observé est le supplément de l'angle compris entre les deux faces. Le gros fil de la lunette fixe est destiné à trouver le pouvoir réfringent d'un cristal. Ayant tous les moyens pour mesurer avec une grande précision les angles plans et les inclinaisons des faces des cristaux, nous allons exposer les données principales qui peuvent servir à faire connaître leur structure.

On a vu précédemment comment Haüy était parvenu, par le clivage, à extraire d'un cristal prismatique de chaux carbonatée le rhomboèdre primitif; appliquons cette méthode à d'autres formes de la même espèce pour en faire connaître la fécondité. Si l'on prend le rhomboèdre aigu de la même substance $a\ a'$ (pl. I, fig. 8), dont l'angle plan du sommet est de 75°31′ (variété inverse), et qu'on dirige les plans parallèlement aux arêtes supérieures, on arrive au rhomboèdre primitif ss'. Dans le dodécaèdre à triangles scalènes bb' (pl. I, fig. 9) (métastatique), le clivage doit être dirigé de telle manière que les bords inférieurs du rhomboèdre se confondent avec ceux du dodécaèdre, et que les plans de clivage passent par ces mêmes bords pris deux à deux. Si l'on considère d'autres substances, telles que l'amphibole, le pyroxène, le feldspath, l'arsenic sulfuré, etc., on arrive également par le clivage à un noyau primitif, qui est un prisme oblique rhomboï-

dal, dont la base est plus ou moins inclinée à l'axe, et dont les faces latérales font entre elles des angles plus ou moins ouverts, suivant l'espèce à laquelle appartient ce noyau. La baryte et la strontiane sulfatée, la stiibite ont pour formes primitives des prismes rhomboïdaux droits. Le quartz, le corindon, le fer oligiste, le mercure sulfuré ont pour forme primitive un rhomboèdre plus ou moins aigu; la galène ou plomb sulfuré, un cube, etc.; enfin, toutes les formes primitives observées jusqu'ici peuvent être rapportées aux six formes suivantes :

1° Régulière ou tétraédrique.
2° Prisme à base carrée.
3° Rhomboèdre.
4° Prisme droit rhomboïdal.
5° Prisme oblique symétrique.
6° Prisme oblique non symétrique.

Quand un cristal se prête à la division mécanique dans tous les sens, rien n'est plus simple que d'en extraire le noyau primitif; mais quand la division mécanique ne peut s'effectuer en tout ou en partie, il faut avoir recours à d'autres expédients pour l'obtenir. Le premier est la direction des joints naturels : on brise un cristal de manière à laisser subsister en partie la face qui est parallèle à un joint; et en faisant mouvoir ensuite cette face à une vive lumière, on aperçoit deux espèces de rayons réfléchis, les uns renvoyés par les résidus de la face, les autres par les lames intérieures. En faisant tourner le cristal, on voit paraître et disparaître successivement les rayons qui produisent les deux reflets; on en conclut alors qu'il existe dans l'intérieur du cristal un joint naturel situé parallèlement à la face dont on parle. D'autres fois, quand le clivage et les stries ne peuvent donner aucune indication, on fait rougir le cristal, et on le jette dans l'eau; il arrive quelquefois que l'on met ainsi à découvert les faces de la forme primitive. On est parvenu à retirer, par ce moyen, d'un prisme de cristal de roche, le rhomboèdre considéré comme sa forme primitive. On peut poser en principe que toutes les formes cristallines d'une même substance minérale, appartenant au même système cristallin, peuvent être rapportées à une même forme unique; nous disons appartenant au même système cristallin, car il peut arriver qu'une même substance possède deux systèmes cristallins différents, conduisant à deux formes primitives incompatibles. La chaux carbonatée, l'arragonite, en sont un exemple; le soufre cristallisé par fusion et le soufre natif, un autre.

En effet, la chaux carbonatée a pour forme primitive un rhomboèdre dont les faces ont pour inclinaison 105°,5′ et 74°,55′ ; l'arragonite, un prisme droit rhomboïdal dont les inclinaisons sont de 116°,5′ et 63°,55′, deux formes qui ne peuvent se déduire l'une de l'autre. Les cristaux de soufre naturels et ceux obtenus par voie humide ont pour forme primitive un prisme rectangulaire droit, tandis que ceux obtenus par fusion et décantation dérivent de prismes obliques à bases rhombes, qui ne peuvent être rapportés au prisme droit rectangulaire. La forme primitive se prête elle-même aussi au clivage, et l'on est conduit alors à des solides qui ne sont plus susceptibles d'aucune division mécanique, et que Haüy a nommés *molécules intégrantes*. En groupant ces molécules, soit dans la direction des arêtes, soit dans celle des diagonales du noyau primitif, d'après certaines lois hypothétiques, il est parvenu, comme on le verra plus loin, à reconstruire les formes cristallines secondaires.

Citons quelques exemples de molécules intégrantes. Dans un cube de spath-fluor cc' (pl. I, fig. 10), si l'on abat successivement les huit angles par des plans perpendiculaires aux diagonales tels que abc, $a'b'c'$, etc., on obtient, d'une part, des tétraèdres qui, ne pouvant être sous-divisés qu'en abattant les angles, représentent la forme de la molécule intégrante; de l'autre, un octaèdre régulier, qui est la forme primitive. La galène donne un cube pour la forme primitive, ainsi que pour la molécule intégrante. Le parallélipipède conduit, par la division mécanique, à des parallélipipèdes semblables entre eux et au type principal. C'est ainsi que le rhomboèdre primitif de la chaux carbonatée se divise en d'autres rhomboèdres semblables; ce clivage doit s'effectuer jusqu'au dernier terme de la division mécanique. Il y a cependant d'autres divisions qui partagent le rhomboèdre en deux prismes triangulaires; mais pour l'instant, nous n'en parlerons pas. La forme primitive du sel marin, qui est un cube, se divise également en cubes.

Le dodécaèdre rhomboïdal R R′ (pl. I, fig. 11) est divisible par des plans passant également par le centre, et parallèlement aux différentes faces; on obtient alors vingt-quatre tétraèdres, dont chacun a pour faces quatre triangles isocèles.

Il n'en est plus de même des autres formes; le prisme hexaèdre régulier (fig. 14, pl. II), celui de la chaux phosphatée, par exemple, peut être divisé par des plans qui passent par les centres des bases et les diagonales, d'où résultent six prismes triangulaires équilatéraux. En continuant les divisions suivant des directions parallèles aux premières, on obtient des prismes triangulaires qui, pris deux à deux,

forment des parallélipipèdes ou prismes droits. On peut donc considérer le prisme hexaèdre régulier, comme formé de la réunion de prismes droits.

Le prisme droit rhomboïdal, forme primitive de la staurotide, peut être divisé par des plans non parallèles aux faces. Dans ce prisme, les plans les plus inclinés forment entre eux un angle de 129° 30′. Le clivage montre que ce prisme peut être subdivisé par un plan qui passe par les petites diagonales des bases, de manière à produire deux prismes isocèles semblables. De même, la forme primitive de la baryte sulfatée A B (pl. I, fig. 12), qui est un prisme de même espèce, présente un clivage suivant les deux diagonales de chaque base, ce qui produit quatre prismes triangulaires, dont les bases sont des triangles rectangles scalènes égaux et semblables. Ces exemples, et d'autres que l'on pourrait citer, montrent que les solides, les uns prismatiques, les autres tétraèdres, que l'on obtient par la subdivision d'un parallélipipède faisant fonction de forme primitive, sont autant d'indices qui mettent sur la voie de la forme de la molécule intégrante, ou, du moins, de la forme la plus simple que l'on puisse obtenir par la division mécanique. Si donc on avait des instruments assez délicats pour atteindre le dernier terme de cette division dans un rhomboèdre de chaux carbonatée, on aurait encore un rhomboèdre semblable, susceptible d'être divisé dans quelques circonstances, suivant certaines directions, et après quoi on ne pourrait plus agir sans séparer l'acide carbonique de la chaux. Jusqu'ici on n'est parvenu à extraire des six solides auxquels on rapporte les formes primitives, que trois formes de molécules intégrantes ou solides plus simples, le tétraèdre, le prisme triangulaire et le parallélipipède.

Quoiqu'il ne soit pas possible de démontrer que les formes géométriques dont il est question, représentent celles des molécules sur lesquelles agit la force d'agrégation, on ne peut disconvenir, néanmoins, qu'elles n'aient de très-grands rapports avec les formes des molécules élémentaires, puisque l'on peut concevoir par la pensée, la division mécanique poussée jusqu'à la dernière limite, c'est-à-dire, jusqu'au point où il n'y ait plus à vaincre que les forces chimiques pour séparer les éléments.

III. *De la loi de symétrie.*

Lorsqu'on examine attentivement un cristal, on est frappé de la symétrie des modifications que subissent fréquemment les arêtes ou les angles solides; on ne tarde pas à reconnaître la belle loi de Haüy,

qui sert de base à la dérivation des formes secondaires par la forme primitive, c'est-à-dire, que, dans tout cristal, les parties semblablement placées par rapport aux axes sont modifiées de la même manière : ces modifications consistent en facettes plus ou moins étendues, qui remplacent les arêtes et les sommets; on peut les réduire à quatre cas principaux : 1° les arêtes ou les angles solides de même espèce sont, sauf quelques exceptions rares, modifiés tout à la fois : le cube, l'octaèdre, le rhomboèdre et le prisme à base carrée en sont des exemples (fig. 10, 20, 21); 2° les arêtes ou les angles solides non semblablement placés sont modifiés différemment, comme le prisme rhomboïdal en offre des exemples; 3° lorsqu'une arête ou un angle solide sont formés par des plans de même espèce, les modifications produisent le même effet sur chacun de ces plans. Nous trouvons cette règle dans le cube où, toutes les faces étant égales, les arêtes sont toujours modifiées par une ou deux facettes également inclinées sur les plans adjacents. Il en est de même des angles solides; 4° lorsqu'une arête ou un angle solide se trouve formé par des plans d'espèces différentes, ces modifications proviennent des effets différents sur chacun de ces plans; cette règle est une conséquence de la loi de symétrie; exemple : le prisme à base carrée.

Deux formes du même genre qui n'ont pas exactement les mêmes dimensions relatives ne présentent pas les mêmes modifications; comme on le reconnaît dans les prismes droits à base carrée. Passons rapidement en revue les modifications que subissent les formes primitives déjà citées, et desquelles il résulte un grand nombre de variétés de formes. Le rhomboèdre de la chaux carbonatée présente deux sortes d'arêtes et deux sortes d'angles : six arêtes qui aboutissent trois à trois au sommet symétrique, et six arêtes latérales aussi semblables; deux angles solides égaux aux extrémités de l'axe, et six angles d'une autre espèce, tous égaux entre eux, disposés latéralement autour de l'axe. Il y aura donc quatre genres de modifications, qui pourront encore être modifiées elles-mêmes, et former un grand nombre de variétés; aussi, en a-t-on déjà observé au moins quinze cents dans la chaux carbonatée. Les autres formes primitives peuvent éprouver également des modifications nombreuses, mais toujours soumises à la loi de symétrie; néanmoins, il est des cas où ces modifications ne sont pas symétriques, et que le physicien a le plus grand intérêt à étudier, car c'est dans les écarts de la nature que l'on peut saisir quelques-unes des causes qu'elle met en jeu pour produire les effets. Les anomalies qui font naître des modifications non

symétriques n'ont été observées jusqu'ici que dans les systèmes cubique, rhomboédrique et prismatique carré. Dans le premier, nous trouvons le dodécaèdre pentagonal, l'icosaèdre, le triacontaèdre, et toutes leurs modifications. Le dodécaèdre pentagonal, comme l'indique son nom, est formé de douze faces pentagonales, et diffère beaucoup du dodécaèdre pentagonal de la géométrie, dont les pentagones sont réguliers et leurs angles égaux à 108°, les inclinaisons des plans sont égales à 116°,32',32". Dans celui de la nature, les pentagones ne sont pas réguliers; l'un des angles plans est d'environ 121°30'; les deux autres angles d'environ 106°,37', et les deux autres d'environ 108°,38'. L'inclinaison mutuelle des deux faces voisines est pour les unes d'environ 127°, pour les autres d'à peu près 113°30'.

Ce solide est produit par la moitié des modifications qui conduisent au polyèdre à faces triangulaires. L'isocaèdre de la minéralogie est composé de vingt faces triangulaires. Dans la géométrie, les faces sont égales et équilatérales; dans la nature, huit des faces sont des triangles équilatéraux, et douze des triangles isocèles. Ce solide résulte de la combinaison de l'octaèdre régulier et du dodécaèdre pentagonal. Le triacontaèdre est formé, dans la nature, de trente faces quadrilatères, dont six sont des rhombes et vingt-quatre des trapèzes; il est le résultat de la combinaisen des faces du cube avec la moitié de celles qui conduisent au solide de quarante-huit faces : dans la géométrie, ce solide est formé de trente rhombes. Ces formes ne sont pas produites par des modifications symétriques, et cependant elles peuvent être modifiées symétriquement, et donner lieu à toutes les formes que l'on déduit de tous les autres solides simples du système cubique. Rien n'est plus facile que de voir comment l'icosaèdre peut passer au cube, au dodécaèdre rhomboïdal, etc., etc.

Il existe d'autres défauts de symétrie dans le système cubique qu'il est important de connaître, en raison de certaines propriétés physiques qu'acquiert le cristal qui en est l'objet. Il arrive quelquefois que, dans le cube simple ou dans le cube modifié sur les arêtes, on observe des modifications par plusieurs facettes qui n'affectent que la moitié des parties sur lesquelles elles devraient agir, et qui conduisent au tétraèdre régulier ou à un solide à douze faces pentagonales.

Dans le dodécaèdre rhomboïdal, on voit quelquefois la moitié des angles composés de trois plans, modifiés par une facette qui produit encore le tétraèdre, ou la moitié des arêtes modifiées par des facettes

tangentes, ce qui conduit au dodécaèdre triangulaire. Une de ces modifications se présente dans la boracite (pl. II, fig. 20) dont la forme primitive est le cube suivant Haüy et d'après les dernières observations de M. Biot. Dans les cristaux artificiels d'alun, on observe des modifications tangentes qui n'affectent que quatre arêtes. Dans le système prismatique carré, il y a peu d'exemples de dissymétrie, et encore n'en est-on pas assuré. Dans le système rhomboédrique, nous trouvons deux exceptions à la loi de symétrie, qui se rapportent l'une au quartz ou cristal de roche, l'autre à la tourmaline.

Dans le quartz, il y a des cristaux qui sont modifiés par des facettes tournées seule à seule vers un pan du prisme, de gauche à droite; dans d'autres cristaux, par des facettes tournées de droite à gauche; il est évident que, dans chaque cas, les cristaux ne présentent que la moitié des facettes résultant d'une modification symétrique. Il est aussi des cas où les cristaux offrent plusieurs modifications du même genre.

Dans la tourmaline (pl. II, fig. 19), la dissymétrie se manifeste d'une autre manière : l'un des prismes hexagonaux ne présente jamais que la moitié de ses faces, de sorte qu'il résulte de la combinaison de deux prismes un prisme à neuf pans. Dans d'autres cas, ce sont des rhomboèdres qui se trouvent à l'un des sommets, et qui n'existent pas à l'autre, ou bien c'est la modification du sommet par une seule face perpendiculaire, ou bien encore ce sont des modifications sur les arêtes d'intersection d'un des sommets avec les plans.

M. Delafosse a cherché à démontrer que, dans ces différents cas, les anomalies n'étaient qu'apparentes, attendu qu'ils rentraient dans un autre ordre de phénomènes auquel on n'avait pas encore fait attention. Voici de quelle manière il expose ses idées à cet égard :

Prenons les cristaux de boracite, qui sont des cubes, dont quatre seulement de leurs angles sont quelquefois modifiés, de telle sorte qu'aux extrémités d'une diagonale, l'un des angles est modifié, l'autre ne l'est pas, ce qui établit une dissymetrie, puisque les deux angles étant identiques, devraient être modifiés en même temps. Pour prouver que la loi de symétrie n'est pas violée, M. Delafosse admet que le cube n'a pas pour molécules intégrantes des cubes, mais bien des tétraèdres rangés en file, de manière qu'une base correspond à un angle solide, et le sommet à l'angle opposé, qui par là se trouve d'une espèce contraire au premier. Si les choses se passaient ainsi, la loi de symétrie ne serait pas violée. Le même raisonnement peut

s'appliquer aux autres formes qui dérogent à la loi de symétrie.

Le physicien doit prendre en considération la structure d'accroissement, parce qu'elle lui révèle la manière dont le cristal s'est accru successivement depuis l'instant où il a pris naissance jusqu'à ce qu'il ait atteint le volume sous lequel on le voit. Du moment qu'un noyau cristallin s'est formé, il augmente de volume par une nouvelle agrégation de particules, qui peuvent se grouper autour de ce noyau, et en augmenter indéfiniment la masse. Cet accroissement se fait quelquefois d'une manière régulière, comme on le voit fig. 17 et 18, pl. I. Quelquefois l'accroissement peut être produit par des causes qui nous échappent, mais qui nous permettent de reconnaître les changements d'accroissement aux changements de forme. C'est ainsi que, dans la fig. 21, pl. II, on voit un octaèdre devenir un cube, puis un dodécaèdre, puis enfin un cube. La nature nous présente de pareils effets, que nous reproduisons dans nos laboratoires, en faisant varier la nature du liquide dans lequel s'opère la cristallisation. Il arrive quelquefois que, bien que la forme ne change pas pendant toute la durée de l'accroissement, il y a cependant des modifications telles, à certaines époques, dans le mode d'accroissement, que les parties superposées peuvent se déboîter les unes des autres quand le cristal est brisé, comme on le voit fig. 22, 22 *bis* et 23, pl. II. On trouve des exemples de ce genre dans le cristal de roche, le plomb et l'alun. Les causes qui interviennent dans cette circonstance sont telles, qu'il arrive quelquefois que des couches sont séparées par un intervalle rempli de liquide. C'est ce que nous retrouvons dans les cristaux de salpêtre et de sulfate de soude, quand la solution de ces sels est très-concentrée, et que la cristallisation s'opère rapidement.

IV. *De l'isomorphisme et du dimorphisme.*

On a vu précédemment que toutes les formes d'une substance appartenant au même système cristallin peuvent être rapportées à une même forme type, que nous avons considérée comme la forme primitive. Mais dans quelques circonstances, une substance peut avoir deux systèmes cristallins différents ; on en compte huit ou dix qui jouissent de cette propriété. Il suit de là que la loi de Haüy a lieu, sauf quelques exceptions.

M. Mitscherlich est le premier qui ait appelé l'attention des physiciens sur ce fait. On avait avant lui remarqué que le spath d'Islande et l'arragonite, quoique ayant la même composition chimique, n'a-

vaient pas la même forme primitive : on attribuait cette différence à des principes qui échappaient dans l'analyse de l'arragonite. Aussi multiplia-t-on les expériences, afin de découvrir quels pouvaient être ces principes; mais on cessa de s'en occuper aussitôt que M. Mitscherlich eut découvert le dimorphisme, propriété en vertu de laquelle les mêmes éléments chimiques peuvent se combiner de manière à donner des cristaux qui dérivent de deux formes primitives, et l'isomorphisme, autre propriété d'après laquelle deux combinaisons composées d'éléments différents affectent la même forme cristalline. Commençons par celle-ci.

Depuis longtemps on savait que les sulfates simples et doubles de potasse, d'ammoniaque, de magnésie, de protoxyde de fer et de manganèse, etc., affectaient la même forme. M. Mitscherlich chercha s'il n'en serait pas de même des combinaisons de la même base avec d'autres acides renfermant le même nombre d'atomes; on savait aussi, d'après les recherches de M. Berzelius, que les acides obtenus avec le phosphore et l'arsenic ont une composition analogue, et que leurs combinaisons avec les bases suivent une même loi : par exemple, que les quantités d'oxygène avec lesquelles le phosphore se combine pour former l'acide phosphorique et l'acide phosphoreux, sont précisément les mêmes que celles qui entrent dans la composition des acides arsénique et arsénieux. Il suit de là que, dans les combinaisons de ces acides avec les bases, chaque arséniate a son phosphate qui lui correspond, composé d'après les mêmes proportions, combiné avec les mêmes atomes d'eau de cristallisation, et qui a les mêmes qualités physiques. Il y a donc identité dans ces deux groupes, si ce n'est que le radical de l'acide de l'un d'eux est du phosphore, tandis que celui de l'autre est de l'arsenic. Ainsi, en ajoutant aux deux acides dont on vient de parler, du carbonate de soude en excès, on obtient des cristaux dans lesquels l'oxygène de la base est à celui de l'acide : : 2 : 5. Le biarséniate et le phosphate de potasse qui en résultent prennent la même forme, qui est un prisme à bases carrées, terminé par les faces d'un octaèdre à bases carrées; les angles sont les mêmes dans l'un et l'autre prisme. Cet exemple d'isomorphisme est frappant.

D'un autre côté, la magnésie, les protoxydes de fer, de manganèse, et l'oxyde de zinc, donnent la même forme cristalline lorsqu'ils se combinent avec les mêmes acides dans la même proportion; ce qui tend à prouver que deux substances qui ont la même composition atomique cristallisent de la même manière; mais la consé-

quence n'est pas rigoureusement exacte, car le phosphate et l'arséniate neutre de soude, quoique ayant des formes presque identiques, montrent une petite différence dans les angles : à quelle cause doit-elle être attribuée? nous verrons bientôt d'où elle peut provenir; de là on a conclu que la forme pouvait être la conséquence de la composition atomique; cette règle a néanmoins des exceptions, puisque le biarséniate et le biphosphate de soude, au même degré de saturation et combinés avec les mêmes proportions d'eau, prennent des formes cristallines différentes et inconciliables. Voici des corps isomorphes : 1° l'oxygène, le soufre, le sélénium; 2° le fluor, le chlore, le brôme, l'iode; 3° le phosphore et l'arsénic; 4° le fer, l'aluminium, le silicium, le carbone et le magnésium. Il résulte des considérations précédentes que la chaux, la magnésie, le protoxyde de manganèse, de fer, l'oxyde de cuivre, de zinc, de cobalt, de nickel appartiennent à un même groupe isomorphe, parce qu'un atome de métal est combiné avec deux atomes d'oxygène. La baryte, la strontiane, l'oxyde de plomb appartiennent aussi à un groupe isomorphe. C'est par un pareil motif que les formes cristallines des sulfates de baryte, de strontiane, sont semblables, en ne perdant pas de vue néanmoins cette vérité que les formes peuvent être les mêmes sans qu'il y ait égalité parfaite dans les angles correspondants. Nous rapporterons quelques observations à cet égard qui ne seront pas sans intérêt pour le lecteur.

MM. Beudant et Mitscherlich ont observé que l'angle dièdre du spath d'Islande, qui est de 105°,5', variait dans des échantillons qui renferment plus ou moins de carbonate de magnésie, de fer, de manganèse; que l'angle augmentait à mesure que la quantité des deux premiers devenait plus grande et diminuait pour celle du second. Les observations faites jusqu'ici tendent à prouver que la valeur de l'angle est la moyenne des angles des carbonates considérés isolément, et est proportionnelle à la quantité de chacun d'eux. Considérons, par exemple, un carbonate qui renferme cinq particules de carbonate de chaux et une seule particule de carbonate de fer; l'angle dièdre du cristal est la sixième partie de la somme formée par cinq angles de 105°,5 et un angle de 107°, angle du carbonate de fer, c'est-à-dire, 103°, 24', 10″. On n'a encore trouvé que deux exceptions à cette règle, encore croit-on qu'il y a mélange et non combinaison.

Nous avons présenté l'isomorphisme tel qu'on l'a envisagé jusqu'ici; mais les recherches de M. Kopp sur la constitution des com-

binaisons solides et liquides, d'après les volumes, sont de nature à modifier nos idées à cet égard, en nous montrant que les substances isomorphes ont toutes un même volume spécifique, qu'une différence entre les volumes spécifiques en entraîne nécessairement une dans les formes cristallines, et que l'isomorphisme ne dépend pas du nombre d'atomes qui entrent dans une combinaison, mais bien du volume qu'ils occupent dans cette combinaison. Voici les considérations sur lesquelles s'appuie M. Kopp pour établir ces différents principes : il montre qu'à une différence dans les volumes spécifiques correspond une variation dans la forme cristalline. Prenons les carbonates naturels de baryte, de strontiane, de plomb et l'arragonite, et déterminons leur volume spécifique. La densité de ces substances a été trouvée par MM. Mohs, Karsten et de Breithaupt (*Annales de physique et de chimie*, t. LXXV, p. 413), on a eu

Substance.	Relation des axes entre eux.	Volume spécifique.
BaO, Co_2	$a : b : c$(*) $=$ 0,7413 : 1 : 0,5950	286,72
SrO, Co_2	.... 0,7237 : 1 : 0,6096	255,53
PbO, Co_2	.... 0,7256 : 1 : 0,6100	359,50
CaO, Co_2	.... 0,7205 : 1 : 0,6215	213,48

Ces résultats nous montrent que les carbonates de plomb et de strontiane, dont l'isomorphisme est presque parfait, ont à peu près le même volume spécifique, tandis qu'il n'en est pas de même pour les deux autres carbonates. Nous voyons, en outre, qu'un accroissement du volume spécifique est accompagné d'un accroissement de l'axe a, et d'une diminution de l'axe c.

On peut démontrer encore cette relation entre la forme cristalline et le volume spécifique dans les carbonates qui ont la forme du spath calcaire, le rhomboèdre, mais avec cette différence que les axes et les angles de chaque rhomboèdre ne sont pas les mêmes. Nous citerons particulièrement les carbonates de zinc et de magnésie, de fer et de manganèse, etc., dans lesquels une augmentation du volume spécifique est accompagnée d'une extension de l'axe a. Si l'on chauffe l'un des cristaux, on observe un effet semblable ; c'est-à-dire, que l'axe a est allongé, et le grand angle devient moins obtus. L'identité est telle dans les effets que le calcul donne, 7′ 37″, pour la variation de l'angle 104° 57′ 22″ à 100° de température, tandis que M. Mitscherlich a trouvé par l'observation 8′ 34″ : appliquons à l'isomorphisme les considérations précédentes. On reconnaît généralement

(*) Les axes a, b, c, des cristaux sont ceux annotés par M. Naumann.

que, dans les combinaisons analogues, les parties constituantes sont elles-mêmes isomorphes. Ainsi, on a admis l'isomorphisme de l'étain et du titane uniquement parce que SnO^2 et TiO^2 sont des combinaisons isomorphes. M. Kopp ne partage pas cette opinion. Suivant lui, deux substances peuvent former des combinaisons isomorphes sans que ces substances le soient; il faut seulement que ces combinaisons aient des volumes spécifiques égaux (*Annales de chimie et de physique*, tome LXXV, page 406), ou à peu près les mêmes. Pour savoir jusqu'à quel point ce principe est fondé, il cherche la différence réelle des volumes spécifiques de deux substances, afin de voir dans quel cas elle peut être négligée. En représentant par v, v_1 les volumes spécifiques des deux substances, et par D leur différence réelle, il pose

$$D = \frac{v - v_1}{\frac{1}{2}(v + v_1)},$$

attendu qu'il considère cette différence comme le quotient de la division de la différence absolue des volumes par la moyenne arithmétique de ces volumes.

Voici les différences calculées pour plusieurs cas d'isomorphisme :

Pour le peroxyde de chrôme (vol. spéc. = 186) et le peroxyde de fer (vol. spéc. = 184), on a D = 0,018.

Pour le peroxyde d'étain (vol. spéc. = 133) et le peroxyde de titane (vol. spéc. = 121), on a D = 0,095.

Pour le peroxyde de fer (vol. spéc. = 184) et l'ilménite (vol. spéc. = 197), on a D = 0,068.

Pour le sulfate de potasse (vol. spéc. = 420) et chromate de potasse (vol. spéc. = 462), on a D = 0,095.

Pour le tungstate de plomb (vol. spéc. 358) et le tungstate de chaux (vol. spéc. = 305), on a D = 0,163.

Pour le carbonate de zinc (vol. spéc. = 177) et le spath calcaire (vol. spéc. = 232), on a D = 0,269.

Pour l'arragonite (vol. spéc. = 211) et le carbonate de baryte (vol. spéc. = 294), on a D = 0,328.

On voit qu'en général la valeur de D est peu considérable, et que les plus grandes différences ont été données d'une part par le carbonate de zinc et le spath calcaire, de l'autre par l'arragonite et le carbonate de baryte. Aussi les regardent-ils comme les limites de celles que l'on doit obtenir pour qu'il y ait isomorphisme entre deux substances. Les déductions analytiques de M. Kopp montrent encore qu'il peut arriver que des substances qui ne sont pas isomorphes forment des

combinaisons isomorphes; il faut pour cela que le volume spécifique des combinaisons soit le même; les sels d'argent, par exemple, sont isomorphes avec les sels de sodium, et cependant l'argent n'est pas isomorphe avec le sodium, et en effet, le volume spécifique du premier est 130, et celui du second 299; il existe entre ces deux volumes une différence trop considérable pour qu'il y ait isomorphisme. Cela provient, suivant M. Kopp, de ce que le sodium n'est pas contenu dans ses combinaisons avec son volume spécifique primitif. Il faut donc supposer et prendre pour le volume spécifique du sodium, dans les sels formés par ce métal, le même nombre qui nous représente le volume spécifique de l'argent. On conçoit par là comment les sels analogues d'argent et de sodium peuvent posséder le même volume spécifique sans que les métaux jouissent de la même propriété.

Nous renvoyons au mémoire de M. Kopp, dans lequel on trouvera un grand nombre de faits qui viennent à l'appui de ses idées théoriques. Nous pensons que les vues nouvelles qu'il vient d'émettre sur l'isomorphisme, sont de nature à être prises en considération par les physiciens et les chimistes; passons au dimorphisme.

On a déjà vu que la chaux carbonatée et le soufre cristallisaient chacun dans deux systèmes différents, c'est-à-dire, donnaient naissance à des formes cristallines qui ne dérivaient pas d'une même forme primitive. Nous pourrions citer d'autres exemples qui prouvent qu'un même corps ne prend pas toujours le même arrangement moléculaire, mais parlons d'abord du dimorphisme du soufre en fusion et de l'iodure de mercure. Le soufre, qui est très-fluide quand il est près de cristalliser brusquement, sans acquérir de viscosité sensible, devient fortement visqueux quand on le chauffe bien au delà du degré où il cristallise. On ne peut s'empêcher de reconnaître ici que le dimorphisme du soufre ne provient que de la température à laquelle cette substance a cristallisé dans le système octaédrique et dans le système prismatique. L'iodure rouge de mercure, porté à la température de 150 à 200°, prend une couleur jaune citron; si on abandonne cet iodure jaune à la température ordinaire, il reprend sa couleur rouge primitive, et les cristaux deviennent opaques, de translucides qu'ils étaient auparavant. Dans ces divers changements, le composé ne perd aucun de ses principes; il faut donc qu'il y ait eu changement dans l'arrangement des molécules, et par suite modification dans le système cristallin. Il est bon nombre de substances, telles que le sucre, l'acide arsénieux, etc., dont l'arrangement moléculaire change avec la température. Nous avons un exemple remarquable de dimorphisme dans le charbon et le

diamant, dont les principes constituants, étant les mêmes, l'un cependant est noir et l'autre translucide.

Nous avons déjà parlé du dimorphisme du carbonate de chaux, en citant le spath d'Islande et l'arragonite, qui n'ont pas la même forme primitive; nous ajouterons que l'on peut ramener ces deux substances à un même système cristallin par un changement de température. En effet, si l'on chauffe fortement un cristal d'arragonite, on entend un décrépitement qui annonce un changement dans l'état moléculaire de cette substance, qui alors rentre dans le système rhomboïdal. Les exemples que nous venons de donner suffisent pour caractériser le dimorphisme. Il résulte toutefois des faits que nous venons de rapporter, qu'une même substance composée des mêmes éléments, combinée dans les mêmes proportions, peut affecter deux formes différentes, pourvu que des circonstances particulières exercent une influence dans l'acte de la cristallisation.

V. *Vues théoriques sur la structure des cristaux.*

Dans tout ce qui a été dit jusqu'ici touchant la constitution cristalline des corps inorganisés, nous nous sommes borné à rapporter des faits que nous avons coordonnés du mieux qu'il nous a été possible, sans chercher à remonter aux causes qui les ont produits; ainsi, dans l'examen sur la structure des cristaux, nous avons commencé par montrer comment on pouvait mesurer les angles d'un cristal, en quoi consistait la loi de symétrie, et comment on pouvait extraire ou déterminer la forme primitive, ainsi que celle de la molécule intégrante, ou forme plus simple, soit à l'aide du clivage ou d'un refroidissement brusque, soit à l'aide des stries ou de la lumière, sans nous occuper de quelle manière cette molécule s'était placée sur la forme primitive pour produire toutes les formes secondaires. C'est cette dernière question que Haüy a essayé de résoudre, en s'appuyant sur les faits que nous avons exposés et sur des principes que nous allons indiquer.

Ayant remarqué que les lames enlevées dans le clivage d'un cristal, d'un cube de spath fluor, par exemple, pour arriver à la forme primitive, augmentaient progressivement d'étendue à mesure que l'on approchait du noyau, Haüy en conclut que, pour passer des formes primitives aux formes secondaires, les effets étaient les mêmes que si les lames décroissaient à mesure qu'elles s'écartent du noyau, par la soustraction d'une ou de plusieurs rangées de molécules, les bords de ces lames étant toujours compris dans le même plan; et

comme ces bords sont très-rapprochés, leur ensemble devait constituer les faces du cristal secondaire. Les stries parallèles observées fréquemment sur ces faces indiquent, en effet, l'existence de ces bords, et par suite celle des décroissements.

Ces observations, que l'on a souvent l'occasion de vérifier, tendent à justifier les vues théoriques de Haüy, en vertu desquelles la cristallisation a dû commencer par produire un noyau absolument semblable à celui obtenu par la division mécanique, et que ce noyau s'est ensuite accru par une superposition en retrait de lames analogues à celles que donne la division mécanique. Suivant cette manière de voir, qui gagne à l'examen, les faces des cristaux secondaires ne seraient que la somme des lignes qui résultent de l'alignement des molécules formant des lames de superposition qui ont subi des décroissements, soit sur les côtés, soit suivant les diagonales ou d'autres directions déterminées par le mode de superposition des lames et les angles des faces.

Il est impossible d'entrer ici dans tous les développements nécessaires pour exposer complétement tout ce qui concerne les décroissements. Ces développements trouvent naturellement leur place dans un traité de cristallographie. Nous devons nous borner à exposer ici les principes généraux de la théorie, et montrer comment a pu s'effectuer, dans les cas principaux, le groupement des molécules intégrantes autour du noyau primitif, pour produire les formes secondaires. Cette théorie, dont on ne doit pas pousser trop loin les conséquences, doit attirer néanmoins l'attention du physicien, qui est quelquefois à même de vérifier si les bases sur lesquelles elle repose sont exactes. Citons quelques exemples de décroissement en premier lieu sur les bords, ensuite sur les angles.

Exemple de décroissement sur les côtés.

Prenons pour forme primitive un prisme droit symétrique à base carrée (pl. 1, fig. 13). Si l'on suppose que des lames soient appliquées sur la base ABCD, fig. 17, en éprouvant un décroissement sur les bords qui soit le même pour tous, la même lame aura donc sur chaque bord une ou plusieurs rangées de moins que si le prisme eût continué à croître en hauteur; la seconde rangée éprouvera, relativement à la première, le même décroissement que celle-ci, par rapport au noyau; il en résultera évidemment, sur la face supérieure, une pyramide droite quadrangulaire dont les faces seront interrompues par ces angles saillants et rentrants; mais comme les molécules sont

d'nne ténuité extrême, l'œil ne pourra pas saisir cet assemblage, et les faces paraîtront planes. Chaque face, semblablement placée par rapport à l'axe, éprouvera les mêmes modifications, de sorte que la base inférieure, donnant également naissance à une pyramide, la réunion des deux pyramides formera un octaèdre. D'un autre côté, rien ne s'oppose à ce que l'épaisseur de chaque lame soit le double, le triple de celle d'une molécule, et qu'elle se combine tellement avec la différence en largeur, que l'effet du décroissement soit toujours une pyramide. La fig. 18, pl. 1, indique deux décroissements sur les bords du cube, d'où résulte un dodécaèdre à faces pentagonales, comme nous en avons un exemple dans le fer sulfuré. Le premier décroissement a lieu par deux rangées en largeur, parallèlement à deux bords opposés; le second, par deux rangées en hauteur parallèlement aux deux autres bases de la même face. De plus, chaque décroissement agit sur les différentes faces du cube, suivant trois directions perpendiculaires entre elles. Nous n'entrerons dans aucun détail sur les formes qu'on obtient, quand le décroissement se fait par une, deux, trois rangées de molécules, soit en hauteur, soit en largeur; nous renvoyons pour cela aux ouvrages spéciaux, dans lesquels on trouvera des développements convenables; ce qu'il nous importe de connaître, ce sont les principes.

Exemple de décroissement sur les angles.

Prenons encore un prisme droit, symétrique, à base carrée, que l'on peut supposer divisée en une multitude de petits carrés qui sont les facettes extérieures d'autant de molécules soustractives : si l'on suppose une suite de lames empilées sur cette base et décroissant vers leurs quatre angles d'une rangée, on aura les dispositions suivantes, fig. 15 : vers l'angle D, la molécule *a* manquera; la seconde rangée aura de moins que la première, les deux molécnles *b*, *k*; la troisième aura de moins les trois molécules *c*, *u*, *l*, etc.; la face, au lieu d'être sillonnée par des espèces de cannelures, comme dans le cas du décroissement sur les bords, sera hérissée de petites pointes qui, échappant à la vue en raison de leur petitesse, formeront un plan continu. Si le décroissement se fait par une simple rangée, on est conduit à un dodécaèdre. S'il a lieu par deux, par trois rangées, ou bien que le décroissement soit intermédiaire, et que la molécule qui remplit la fonction de molécule soustractive, soit un assemblage de deux ou trois molécules simples, on est conduit à des formes dont il est facile de se rendre compte pour peu que l'on ait des notions de géométrie. Nous

renvoyons également aux traités de cristallographie, pour tout ce qui concerne ces formes et les calculs qui servent à déterminer les inclinaisons des faces.

Réflexions sur la théorie des décroissements.

La théorie d'Haüy repose en partie sur des faits, en partie sur des hypothèses qu'on ne saurait admettre complétement; par exemple, pour avoir des décroissements en nombre entier de molécules, soit sur les angles, soit sur les faces, on est obligé de prendre pour formes primitives et pour molécules intégrantes des solides, dont les inclinaisons des faces et les dimensions permettent d'atteindre le but. Il faut l'avouer, ces inclinaisons ne sont pas toujours d'accord avec l'expérience. Tant que l'on n'a employé que des goniomètres grossiers, qui ne donnaient que des résultats comportant des erreurs de $\frac{1}{2}$ degré et même de 1°, Haüy a toujours pensé qu'il y avait un accord parfait entre les déductions du calcul et les résultats de l'expérience. Il n'en a plus été de même dès l'instant que l'on a soumis la mesure des angles des cristaux à des moyens très-précis. En effet, au moyen du cercle répétiteur, Malus trouva que la plus grande incidence des faces du rhomboèdre primitif de la chaux carbonatée était de 105°5′, valeur qu'avait également obtenue Wollaston avec son goniomètre à réflexion.

D'après des considérations géométriques, et en ayant égard à toutes les lois simples de décroissement en vertu desquelles sont formés un certain nombre de cristaux secondaires de la chaux carbonatée, Haüy assigna à cette incidence une valeur de 104°,28, différence de 23′ avec la précédente; cette différence qui n'a pas peu contribué à jeter du doute à l'égard de quelques-unes des données de la théorie, a été attribuée par Haüy à des inégalités qui se trouvaient sur les surfaces. Mais, éclairés par de nombreuses expériences, les physiciens actuels n'en ont pas moins adopté l'angle déterminé par Wollaston et Malus, comme représentant la plus grande incidence de deux faces du rhomboèdre primitif de la chaux carbonatée.

Quoi qu'il en soit, la théorie des décroissements rend compte d'un grand nombre de faits; elle s'accorde parfaitement avec la loi de symétrie, loi en vertu de laquelle toutes les parties d'une forme primitive, angles et arêtes semblablement placés par rapport à l'axe, éprouvent les mêmes modifications, c'est-à-dire que les diverses faces de la forme primitive qui sont identiques, égales et semblables, doivent s'assimiler les unes aux autres dans les décroissements que subis-

sent les lames de superposition qui les recouvrent. Nous terminerons ce que nous avons à dire sur le décroissement, en faisant voir comment il se combine avec la structure. On a vu précédemment qu'un cristal, qnelle que soit sa grosseur, donne par le clivage ou tout autre moyen, soit physique, soit analytique, une forme primitive qui n'est certainement pas celle sur laquelle la nature a opéré ; on peut se demander alors sur quel noyau primitif le décroissement a commencé. Pour répondre à cette question, il suffit d'examiner avec attention les cristaux d'une même substance, et d'en suivre le développement progressif, jusqu'à ce qu'ils aient pris un grand accroissement : on ne tarde pas à voir que l'arrangement des molécules, par lequel la formation des cristaux a commencé, représentait déjà comme en raccourci celui qui existe dans le plus volumineux. Le cristal n'a donc fait que s'accroître en conservant la même forme. Un exemple suffira pour montrer comment Haüy considérait que les choses se passent. Prenons le dodécaèdre à plans rhombes, originaire du cube. On peut admettre que le noyau de ce dodécaèdre, dans le premier instant de sa formation, ait été le plus petit qui puisse résulter de la réunion d'un nombre impair de molécules cubiques, pl. II. fig. 26, auquel cas il devait être composé de vingt-sept de ces molécules, et que chacune des faces *e o i* renfermait neuf petits carrés qui étaient les faces extérieurees d'autant de molécules ; et si nous supposons six nouvelles molécules, telles que *m*, appliquées une à une sur les carrés du milieu, nous aurons l'assortiment que représente la figure, et qui offre déjà l'effet initial du décroissement par une rangée sur les bords. Dans l'instant suivant, de nouvelles molécules s'étant rangées autour du dodécaèdre déjà formé, on aura un noyau qui sera un assemblage de cent vingt-cinq molécules, et ainsi de suite. On voit donc que, dans le passage d'nn terme au suivant, la première lame de superposition devient partie intégrante dans le noyau qui répond à ce terme; chacune des autres lames s'accroît par l'addition d'une rangée de molécules sur chacune de ces lames, et ainsi de suite.

L'observation vient à l'appui des vues qu'on vient d'exposer sur la manière dont s'opère l'accroissement des cristaux. Nous en avons la preuve dans certains cristaux de quartz prismés, qui ont été brisés un peu au-dessus de la base d'une de leurs pyramides. On aperçoit des couches concentriques de différentes teintes, qui ont contribué successivement à l'augmentation du volume. On trouve aussi des cristaux de chaux carbonatée prismés, dont la base est marquée d'hexagones concentriques qui offrent des indices de l'accroissement en

épaisseur. On voit donc que le cristal, en commençant par un embryon imperceptible à nos yeux, s'accroît par une superposition d'enveloppes qui, en se succédant l'une à l'autre, laissent subsister les traits de la forme originale; d'après cela, l'opération de la nature a son origine au centre du cristal. Si la théorie suppose qu'elle part de la surface du noyau, c'est que notre esprit s'accommode d'autant mieux de cette manière de voir, que c'est d'elle que procèdent les vrais principes de la théorie, dont le but est d'appliquer notre géométrie à celle de la nature.

VI. *Des formes qui s'écartent de la régularité cristalline pour arriver à l'état amorphe.*

Dès l'instant que les forces qui président au groupement régulier des molécules n'agissent plus en toute liberté, les faces des cristaux s'oblitèrent peu à peu, et finissent par être méconnaissables. Dans l'octaèdre régulier, par exemple, on voit quelquefois quatre faces prendre tellement d'accroissement, que les quatre autres sont réduites à de très-petits triangles; d'autres fois, il n'y a que deux faces qui s'élargissent. Le dodécaèdre rhomboïdal nous offre des variations analogues, ainsi que le dodécaèdre dans le rubis et le diamant.

Dans le système rhomboédrique, on observe également un grand nombre d'oblitérations plus ou moins remarquables. On trouve, par exemple, des rhomboèdres tronqués au sommet par des faces tellement larges, que le solide est réduit à une lame biselée sur ses bords. Dans les prismes terminés par des dodécaèdres triangulaires, on rencontre un grand nombre de variations. Quelquefois, quatre faces de la pyramide sont réduites à de très-petits triangles, et quelquefois aussi elles disparaissent, de sorte que le cristal ressemble à des fragments de quartz. Nous pourrions citer encore un grand nombre de variations qui donnent des cristaux tellement aplatis, que l'on ne reconnaît plus les formes primitives. On dit, dans ce cas-là, que la substance est *lamelliforme*. Ces lamelles sont des rhomboèdres, des prismes de toute espèce, plus ou moins longs relativement à leur diamètre. Quand ce diamètre est très-petit, et que les prismes ont une grande longueur, on dit alors que le corps est *capillaire*. Toutes les fois que les arêtes ou les angles solides des cristaux sont modifiés par un grand nombre de facettes très-rapprochées les unes des autres, les faces semblent s'arrondir, et l'on n'obtient plus que des sphéroïdes lenticulaires qui rappellent plus ou moins la forme type. Les formes sphéroïdales proviennent en général du système cubique ou

des cristaux des autres systèmes qui en approchent ; quelquefois elles appartiennent à des octaèdres raccourcis, allongés ; il en résulte alors des formes irrégulières, comme le diamant nous en offre des exemples. La configuration ovoïde s'observe dans les dodécaèdres scalènes modifiés au sommet par un rhomboèdre, et sur les angles latéraux par les faces du prisme. Les modifications cylindroïdes proviennent des cristaux prismatiques à six, huit et douze pans. Les configurations lenticulaires proviennent de cristaux symétriques très-aplatis. Quant aux cristaux à faces creuses, ils se produisent quand leurs arêtes seules sont formées nettement. Outre les modifications que nous venons de signaler, il en est d'autres que le physiciendoit connaître, en raison de l'influence qu'elles exercent sur les propriétés optiques des cristaux, dont nous nous occuperons ultérieurement. Nous voulons parler du groupement des cristaux.

Les cristaux se rencontrent rarement isolés; on les trouve presque toujours groupés de diverse manière; dans certains cas, ils se groupent d'une manière symétrique, et alors le groupement obéit encore à la loi de symétrie. Voici les lois observées à cet égard par Haüy :

Les plans de jonction de deux cristaux sont toujours parallèles à des faces qui existent ou qui sont possibles, c'est-à-dire, qu'ils se réunissent suivant un plan qui se trouve dans les deux cristaux. Cette circonstance se remarque, non-seulement dans les cristaux de même espèce, mais encore dans les cristaux d'espèce différente; de même, quand un sel cristallise sur les parois d'un vase, il adhère toujours à ces parois par une des faces qu'il possède ou qu'il peut posséder. Il arrive souvent que les faces de deux cristaux groupés prennent un si grand accroissement qu'ils semblent être refoulés par leur pression mutuelle. Il y a symétrie dans le groupement, toutes les fois que les cristaux se réunissent sur des faces et des côtés homologues de même étendue.

On distingue deux espèces de groupements, les groupements directs et les groupements inverses. Pour concevoir le premier groupement, il faut supposer un cristal dans une certaine position, et un autre qui vienne se joindre à lui en se plaçant exactement dans la même position. Le second groupement a lieu quand un prisme rhomboïdal, par exemple, se place, par rapport à un autre prisme, dans une position inverse. Dans le groupement inverse, le second prisme est placé comme si, se trouvant d'abord dans la même position, il avait fait une demi-révolution qui ait ramené la base supérieure en bas, et l'inférieure en haut. Ce cristal ne peut faire qu'une demi-révo-

lution, car, s'il en était autrement, les cristaux se croiseraient ou se retrouveraient dans la position directe. En examinant avec attention ces groupements réguliers dans deux cristaux, on reconnaît que les choses se passent comme si un cristal, étant coupé en deux, une des moitiés avait tourné sur l'autre, en faisant une demie ou un sixième de révolution.

Les groupements se distinguent aux angles rentrants des cristaux; néanmoins il existe des cristaux groupés qui n'ont pas d'angles rentrants; on ne peut les reconnaître dans ce cas que par le défaut de symétrie, par le clivage et par les phénomènes optiques. Les cristaux groupés, comme on vient de le dire, sont appelés *màcles*. Haüy les a nommés *hémitropies*, parce que, suivant lui, lors de leur formation, les choses se sont passées comme si une des moitiés du cristal avait fait une révolution sur l'autre : il n'y a transposition que lorsque le cristal a fait un sixième de révolution. Nous ne pouvons entrer dans le détail des groupements que présentent les substances minérales; nous dirons seulement que le quartz, la chaux carbonatée, la staurotide (fig. 24, pl. 11), l'étain oxydé, etc., sont celles qui en offrent de plus fréquents exemples.

On remarque qu'il existe dans tous les systèmes cristallins des groupements symétriques qui produisent des cristaux absolument semblables à ceux qui composent ces groupements, pl. II, fig. 22 bis. On en a une preuve en examinant les cristaux allongés qui sont produits par des empilements de cristaux, et il arrive aussi que ces groupements produisent des formes différentes de celles des cristaux composants; c'est ainsi que l'on voit dans le spath fluor des réunions de cristaux cubiques former des octaèdres, et dans le carbonate de chaux des groupes de rhomboèdres d'une autre espèce.

Jusqu'ici il n'a été question que de groupements dans lesquels on reconnaît des traces plus ou moins marquées de cristallisation; nous allons passer en revue les groupements dans lesquels ces traces disparaissent de plus en plus. On a vu que lorsque les arêtes s'émoussent, les cristaux s'arrondissent et présentent les apparences ovoïdes, oviformes, etc. Quand ces cristaux sont en très-grand nombre, et qu'ils sont de petite dimension et placés à côté les uns des autres, ils affectent la forme mamelonnée. On en trouve des exemples dans tous les systèmes cristallins, mais particulièrement dans l'arragonite, le quartz, le sulfure de fer, le carbonate de fer. Ces groupements produisent encore les configurations lenticulaires, cylindroïdes, bacillaires; ces deux dernières dénominations s'appliquent à la réu-

nion d'une foule de prismes très-effilés, accolés les uns aux autres, suivant leur axe, comme l'épidote et la tourmaline nous en offrent de nombreux exemples. Quand les filaments capillaires ont peu d'adhérence, et qu'on peut les séparer facilement, on a alors des masses souples, soyeuses, souvent floconneuses ou feutrées. Les substances qui affectent cet état moléculaire ont été appelées *asbeste*, *amiante*. La structure d'accroissement par superposition ne se manifeste pas seulement dans les cristaux, mais bien encore dans une infinité de cas, comme les pysolithes, les stalactites en sont des exemples. Il en résulte alors quelquefois des formes sphéroïdales. Il y a encore d'autres genres de structures qu'il suffit d'indiquer pour savoir en quoi elles consistent. Nous voulons parler de la structure par retrait, par moulage; de la structure cellulaire, poreuse, etc., et de la structure organique; cette dernière appartient aux corps organisés qui ont été ce qu'on appelle *pétrifiés*; les bois, les madrépores placés dans certaines conditions, perdent, avec le temps, leur matière organique, qui est remplacée par diverses substances, tout en conservant leurs formes; c'est une question dont nous aurons l'occasion de nous occuper dans le deuxième volume.

Quand un liquide tenant en dissolution diverses substances, pénètre dans des fissures d'une roche, et qu'il s'évapore peu à peu, les particules salines ou autres se groupent les unes à côté des autres, dans le sens de la fissure, et donnent naissance à des arborisations désignées sous le nom de *dendrites*, et semblables à celles que forme en hiver la cristallisation de l'eau sur les vitres. L'aspect de ces groupements est, pour ainsi dire, infini, et il suffirait d'indiquer les principaux pour qu'on s'en fît une idée nette. Lorsque des liquides s'écoulent à travers les fentes ou les fissures des roches, dès l'instant que le liquide est au contact de l'air, il s'évapore, abandonne les substances qu'il tenait en dissolution, lesquelles produisent ce qu'on appelle en minéralogie *stalactites* et *stalagmites*.

Les stalactites sont les dépôts formés à la partie supérieure des cavités souterraines; ils ont la forme de cônes allongés, étant quelquefois fistuleux, et présentant ordinairement un amas de cristaux confus. Les stalagmites sont formées par les gouttes de la dissolution qui tombent sur le sol, et produisent des protubérances ou mamelons plus ou moins élevés. Les substances minérales se présentent encore sous des formes dans lesquelles on n'aperçoit plus aucune trace de cristallisation. Ce sont, par exemple, des formes globuleuses présentant un amas considérable de très-petits globules, qui diminuent peu à peu de volume,

et conduisent à l'état amorphe, dans lequel on ne reconnaît plus aucune trace de structure. Dans ce cas, et même dans les précédents, la cassure est le meilleur indice que nous puissions employer immédiatement pour connaître la structure d'un minéral. Quand le corps est cristallisé et susceptible d'être clivé, la cassure est lamelleuse ou laminaire, et la surface mise à nu est plane, plus ou moins vitreuse. Dans les substances qui n'offrent aucun caractère de cristallisation, la cassure est schisteuse, fibreuse, granulaire, suivant que le corps a été formé par des dépôts successifs, en couches parallèles, ou bien par l'agrégation de corpuscules plus ou moins arrondis; elle est compacte quand la structure résulte d'un groupement irrégulier de cristaux ou de grains roulés infiniment petits et fortement pressés les uns contre les autres; elle est vitreuse, résineuse, suivant le genre d'éclat qu'elle présente. Enfin, la cassure est terreuse lorsque les particules fines, provenant d'un précipité chimique, se réunissent en formant des dépôts incohérents qui ne présentent que peu ou point de consistance, et dont les parties se détachent avec une extrême facilité. L'état d'agrégation d'un composé variant suivant que ses molécules affectent ou non une texture cristalline, et selon qu'elles sont plus ou moins écartées, il en résulte des différences souvent considérables dans les propriétés générales des corps. Plus la texture est cristalline, moins les vides interstitiels ou pores sont étendus; plus la somme totale des parties matérielles sous le même volume est considérable, plus la densité est grande; le corps a donc la plus petite densité possible quand il est à l'état terreux. Mais entre l'état cristallin et l'état terreux, il y a une infinité d'états intermédiaires, surtout quand la chaleur intervient pour écarter ou rapprocher les molécules; la densité d'un corps doit donc varier dans un grand nombre de circonstances.

Peut-être devrions-nous parler ici des propriétés générales des corps telles que celles qui se rapportent à l'étendue, à l'inertie, à l'impénétrabilité et à la divisibilité; mais ces propriétés sont exposées avec de tels développements dans les traités de physique, que nous ne pensons pas devoir nous y arrêter.

Nous allons passer actuellement à la structure des corps organisés, question d'un ordre plus élevé que celle qui concerne les minéraux; mais ne voulant pas nous jeter dans des détails anatomiques qui ne sont pas de notre ressort, nous nous en tiendrons aux généralités dont le physicien peut avoir besoin dans ses recherches.

CHAPITRE III.

Vues générales sur la composition et la structure des corps organisés.

I. *Des corps organisés et de leur composition atomique.*

Les corps organisés se reconnaissent à leurs formes arrondies et à la diversité de leurs parties, soumises néanmoins à la loi de symétrie. Ces parties sont, en effet, différentes, suivant les fonctions qu'elles sont chargées de remplir ; la plupart d'entre elles paraissent avoir pour molécules constitutives des globules plus ou moins sphériques ; il est donc impossible de confondre un corps organisé avec un autre qui ne l'est pas, attendu que dans celui-ci toutes les parties sont similaires et susceptibles de donner naissance, en se groupant régulièrement, à des polyèdres à faces planes. Mais il existe encore une différence caractéristique entre ces deux grandes catégories de corps, les uns pouvant toujours exister sans éprouver de changement, tandis que les autres naissent, vivent et meurent. Les éléments des derniers sont donc dans un mouvement continuel, conséquence de la vie ; tandis que les éléments des premiers restent en équilibre, lorsque aucune cause étrangère n'intervient. Si on prend les corps à leur naissance, on trouve encore de grandes différences. Dans les corps organisés, il y a génération ; dans les autres, accroissement moléculaire. Les premiers naissent de germes semblables à eux, et toutes les espèces se perpétuent sans que nous puissions apercevoir aucune différence dans leur configuration ou dans leur constitution ; ils sont composés, en outre, d'un très-petit nombre d'éléments. Il n'en est pas de même des corps inorganisés qui sont formés chacun d'un nombre plus ou moins grand d'éléments, que nous regardons comme simples et doués de propriétés particulières, en vertu desquelles ils peuvent se combiner ensemble et produire des milliers de composés.

Les corps organisés ne renferment, comme parties constituantes essentielles, que quatre éléments, le carbone, l'oxygène, l'hydrogène et l'azote. Ce dernier se montre rarement dans le règne végétal, tandis qu'il est indispensable dans le règne animal. Ces corps renferment en outre, accidentellement, de petites portions de soufre, de

phosphore, de chlore, de fluor, de fer, de potassium, de sodium, de calcium, de magnésium. Mais comment se fait-il que ces quatre éléments inorganiques, en se groupant en diverses proportions, donnent naissance à des quantités innombrables de corps organisés? D'après quel principe la matière passe-t-elle de l'état inorganique à l'état organique? Ce sont, nous le répétons, des mystères que l'homme n'a pu découvrir, et qui sont tellement impénétrables que si, par une cause quelconque, tous les corps organisés étaient réduits à leurs éléments simples, nous ne voyons pas comment les forces qui régissent la nature inorganique pourraient à elles seules reproduire les germes de ces corps.

Les faits les plus authentiques nous apprennent que vers la formation des terrains intermédiaires, la matière a été organisée, animée par une cause créatrice, et que depuis lors la terre n'a pas cessé d'être habitée par une multitude d'animaux de tous genres, et recouverte d'une végétation plus ou moins riche. Il suffit, en effet, d'interroger les diverses formations jusqu'aux terrains primitifs, pour être convaincu que le développement de la vie a été graduel, c'est-à-dire qu'il a commencé par les êtres les plus simples, et a continué jusqu'à l'homme qui parut quand la surface du globe eut cessé d'être bouleversée par ces grands cataclysmes dont nous voyons partout des preuves irréfragables. Nous dirons avec M. Berzelius: « Qu'une force incompréhensi- « ble, étrangère à la matière morte, a introduit le principe de la vie « dans la nature inorganique, et que cela s'est fait, non comme un « effet du hasard, mais avec une variété admirable, une sagesse « extrême, et dans le but de produire des résultats déterminés et une « succession non interrompue d'individus périssables, naissant les uns « des autres, et parmi lesquels l'organisation détruite des uns sert à « l'entretien des autres; et que tout ce qui tient à la nature organique « prouve un but sage et nous révèle un entendement supérieur. « L'homme, en comparant ses calculs, pour atteindre un certain but, « avec ceux qui ont dû présider à la composition de la nature inor- « ganique, a été conduit à regarder la puissance de penser et de cal- « culer, comme une image de cet être auquel il doit son existence. »

Les corps organisés eux-mêmes n'ont le pouvoir d'organiser la matière qu'à l'aide de matériaux déjà organisés; la végétation et la vie animale nous en offrent chaque jour des exemples. En effet, pour se développer, les plantes ont besoin de détritus de matières végétales ou animales; les herbivores se nourrissent de plantes, et les carnivores de débris d'autres animaux. La chimie, malgré ses efforts

pour former des composés organiques, n'a pu obtenir, en faisant réagir divers agents sur des composés déjà organisés, que les acides malique, oxalique, acétique, etc. ; l'urée et des huiles empyreumatiques, au moyen de la distillation, et quelques autres substances placées à la limite des deux règnes, telles que le tannin artificiel et une substance qui a de la ressemblance avec l'extrait de terreau bouilli.

Les matières organiques doivent être classées d'après des considérations physiologiques et chimiques. C'est sous ce point de vue qu'a été envisagée la question par M. Dumas, que nous allons prendre pour guide dans les considérations générales que nous allons présenter à cet égard.

Quand on voit, par le seul effet de la vie ou par la putréfaction, les parties des animaux se résoudre en acide carbonique, eau, ammoniaque, et que, d'un autre côté, on voit les plantes se nourrir essentiellement d'ammoniaque, d'eau et d'acide carbonique, on est disposé à regarder ces corps comme la limite qui sépare le règne minéral du règne organique. Les substances qui précèdent l'apparition de ces trois composés binaires dans toute décomposition de matière organique, sont encore des substances organiques elles-mêmes; celles qui en sont le plus éloignées offrent le type le plus élevé des produits de l'organisation.

On est conduit, par ces considérations, à diviser la matière de l'organisation en cinq classes, savoir :

1° *Matières organisées.* En général non cristallisées, elles se présentent sous forme de cylindres ou de sphéroïdes. Les masses qu'elles constituent ne sont jamais terminées par des plans. Non volatiles; elles sont toujours décomposées par la chaleur. Putrescibles; elles éprouvent des altérations spontanées sous l'influence de l'eau et de l'air à la température ordinaire. Nutritives; elles peuvent ordinairement servir à l'alimentation des animaux. La fibrine, l'albumine, le caséum, la cellulose, l'amidon, appartiennent à ce groupe. 2° *Matières organiques fixes.* Cristallisables et capables de former des combinaisons cristallisables. Non volatiles; elles éprouvent des transformations souvent peu compliquées par la chaleur. Non putrescibles, mais capables de s'altérer sous l'influence de l'air et de l'eau à la température ordinaire. Capables de nourrir d'une manière absolue, mais pouvant participer aux phénomènes de la vie animale. Le sucre, l'acide tartrique, l'acide citrique, appartiennent à ce groupe. 3° *Matières organiques volatiles.* Elles sont volatiles, en effet, sans altération; elles cristallisent ou constituent des combinaisons cristallisables; elles ne sont pas nutritives, et ne prennent même, en général, aucune

part aux phénomènes de la vie animale; elles se conservent presque toujours sans altération spontanée en présence de l'air et de l'eau à la température ordinaire. L'acide acétique, l'alcool, l'acide benzoïque, appartiennent à cette classe. 4° *Composés binaires de la nature minérale.* Eau, acide carbonique, ammoniaque, cyanogène. 5° *Éléments.* Carboue, bydrogène, oxygène, azote.

En général, les matières organisées sont celles qui ont les atomes les plus composés; viennent après les matières organiques fixes, puis les matières organiques volatiles. Ainsi, le travail d'organisation que la vie effectue a pour objet de produire des matières complexes ou organisées. Quand la vie cesse ou quand les matières organisées se défont, se brûlent, elles passent à l'état de matières organiques fixes, de matières organiques volatiles, de composés binaires enfin, car c'est là que leur décomposition s'arrête généralement.

Passons à la composition atomique des substances organisées. Les opinions sont très-partagées à cet égard. Les combinaisons inorganiques sont binaires, ternaires ou quaternaires, etc. La combinaison binaire est formée de deux éléments possédant des proprlétés différentes, et appelés, par cette raison, *antagonistes*, l'un jouant le rôle d'acide, l'autre celui de base. Ces eléments peuvent toujours être séparés l'un de l'autre. Dans les combinaisons d'un ordre supérieur, l'antagonisme existe encore, et l'on peut également séparer les deux éléments composés, du moins dans le plus grand nombre de cas, surtout en employant l'électricité, sans ramener chacun d'eux à leurs éléments simples. C'est ainsi que dans l'acide sulfurique composé d'un atome de soufre et de trois atomes d'oxygène, le soufre joue le rôle de base et l'oxygène celui d'acide, et que ces deux éléments peuvent être séparés l'un de l'autre. Dans le sulfate de potasse formé d'un atome de potasse et d'un atome d'acide sulfurique, l'acide et la base peuvent être également séparés. Toutes les lois de combinaison des atomes dans les composés inorgauiques sont, en général, simples et faciles à découvrir; mais il n'en est pas de même à l'égard des composés organiques, malgré les travaux récents exécutés dans le but de ramener leur composition à celle des autres corps. Quelques exemples vont en donner la preuve.

L'acide sulfurique (S^1O^3), avons-nous dit, renferme un atome de soufre et trois d'oxygène; l'acide hydrochlorique, un atome de chlore et un d'hydrogène, taudis que l'acide tartrique, qui appartient à la nature végétale, est composé de quatre atomes de carbone, quatre atomes d'hydrogène et cinq atomes d'oxygène.

L'acide gallique a une composition encore plus complexe, puisqu'il renferme quatorze atomes de carbone, six d'hydrogène et cinq d'oxygène. On ne reconnait plus dans ces deux derniers acides la composition atomique simple à laquelle sont soumises les combinaisons inorganiques. Néanmoins, les combinaisons organiques ont encore lieu en proportion définie ; il suffit, pour s'en assurer, de considérer les rapports d'après lesquels les atomes organiques composés du premier ordre se combinent avec des atomes inorganiques du premier ordre; on trouve que ces rapports suivent les mêmes lois que celles qui régissent les combinaisons des atomes inorganiques, c'est-à-dire, que l'oxygène de l'un, ordinairement de l'oxyde organique, est un multiple par un nombre entier de l'oxygène de l'autre; ou que, lorsque des acides organiques contiennent cinq atomes d'hydrogène, l'oxygène de ces acides est à celui de l'oxyde inorganique dans le même rapport que celui qui existe pour les atomes inorganiques à cinq atomes d'oxygène. C'est en partant de ce principe que M. Berzelius a déterminé, dans les combinaisons organiques, le nombre d'atomes simples dont elles sont formées. Continuons notre examen.

Deux substances organiques peuvent être composées des mêmes éléments en même proportion atomique, et cependant ne pas jouir des mêmes propriétés physiques et chimiques, comme le sucre et la gomme en sont des exemples. Dans ce cas, il faut que les mêmes éléments, en se groupant de diverses manières, donnent naissance à des molécules constitutives différentes. La nature inorganique nous offre des exemples semblables d'isomérie.

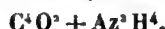
La première question qui se présente quand on s'occupe de la composition des substances organiques est celle-ci : Les combinaisons suivent-elles la loi de l'antagonisme, c'est-à-dire, ont-elles toujours lieu entre deux éléments doués de propriétés opposées? Il est difficile de répondre à cette question, en raison de la difficulté que l'on éprouve à séparer ces éléments. On est donc réduit à imaginer des formules pour représenter la composition des corps inorganiques, en s'appuyant sur l'antagonisme. On peut toujours faire valoir des considérations chimiques qui engagent à adopter une théorie plutôt qu'une autre. Ces théories ne doivent donc pas être considérées comme des vérités absolues, mais bien comme des moyens de classer les corps, de manière à en faciliter l'étude.

MM. Dumas et Liebig ont cherché à jeter les bases d'une nouvelle théorie, en partant de ce principe que, dans la nature organique, on obtient des composés jouissant des propriétés des corps simples, et

qui se comportent tantôt comme acide, tantôt comme base, tels que le cyanogène, l'amyde, le benzoïle, les radicaux de l'ammoniaque, des corps gras, de l'alcool et des corps analogues, lesquels sont les éléments des composés organiques, et non le carbone, l'hydrogène et l'azote, qui ne se montrent que lorsque toute trace d'origine organique a disparu. Ces deux chimistes admettent, en outre, que la combinaison de ces principes entre eux ou avec d'autres éléments suit la même loi que celle qui régit les composés inorganiques, de sorte qu'il n'y a de différence entre les premiers et les seconds qu'en ce que, dans ceux-là, les radicaux sont simples, tandis que, dans ceux-ci, les radicaux sont composés. Quelques exemples feront sentir l'importance de cette théorie. On sait que l'oxamyde renferme

4 at.	carbone,
2	oxygène,
2	azote,
4	hydrogène.

Quand on soumet cette substance à l'influence de divers agents, elle se convertit en oxalate d'ammoniaque. On est parti de là pour dire que sa composition pouvait être représentée par deux éléments binaires, l'oxyde de carbone et une azoture d'hydrogène non encore isolée. Ainsi, la formule de l'oxamyde est



$$C^4O^2 + Az^2H^4.$$

Des considérations dans lesquelles nous ne pouvons entrer tendent à admettre que, dans cette combinaison, l'azoture joue le rôle d'acide, et l'oxyde de carbone celui de base. On voit ainsi comment on ramène la composition de l'oxamyde à celle des composés inorganiques. Passons à un autre composé.

L'urée renferme

4 at.	carbone,
2	oxygène,
4	azote,
8	hydrogène.

Or, comme ce composé se convertit en carbonate d'ammoniaque en décomposant l'eau sous l'influence de divers corps, M. Dumas a adopté encore, pour sa formule, une expression qui indique qu'elle résulte de la combinaison de l'oxyde de carbone jouant le rôle de base avec une azoture d'hydrogène se comportant comme acide. Cette formule devient en effet :



$$C^4O^2 + Az^4H^8.$$

La composition des éthers, suivant M. Dumas, suit la même loi, c'est-à-dire, que ces corps résultent de la combinaison d'éléments composés antagonistes. Il part du principe que l'alcool résulte de la combinaison d'un volume de vapeur d'eau avec un volume d'hydrogène carboné. Si l'on fait réagir sur ce corps divers acides, on est conduit à diverses combinaisons, qu'on peut considérer comme des composés d'hydrogène carboné jouant le rôle de base et de radicaux se comportant comme acide. C'est ainsi qu'on est conduit aux formules simples suivantes :

C^8H^8	hydrogène bicarboné,
$C^8H^8Ch^4$	liqueur des Hollandais,
$C^8H^8H^2O$	éther sulfurique,
$C^8H^8H^4O^2$	alcool,
$C^8H^8H^2Ch^2$	éther hydrochlorique, etc., etc., etc.

Quoique ces formules soient très-simples, on peut néanmoins considérer la composition de ces corps sous d'autres points de vue. M. Berzelius, par exemple, au lieu de prendre l'hydrogène bicarboné comme base, adopte l'éther sulfurique, dont la formule, suivant lui, doit être représentée par



$$C^8H^{10}O.$$

Les formules précédentes se transforment donc en celles-ci :

$C^8H^8Ch^4$	liqueur des Hollandais,
C^8H^8	hydrogène bicarboné,
C^8H^{10}	radical inconnu,
$C^8H^{10}O$	éther sulfurique,
$C^8H^{10}O + H^2O$	alcool,
$C^8H^{10} + Ch^2$	éther hydrochlorique.

Pour représenter ces combinaisons, M. Berzelius fait intervenir tantôt C^8H^8, tantôt C^8H^{10}, ce qui établit moins de régularité dans les formules.

M. Regnault, qui s'est beaucoup occupé aussi des éthers, n'adopte pas les formules précédentes, et a reconnu que l'éther hydrochlorique ne pouvant pas renfermer de gaz oléifiant, on ne pouvait pas, dès lors, admettre ce gaz comme le radical des combinaisons éthérées; suivant lui, les formules précédentes doivent être remplacées par celles-ci :

$C^4H^6Ch^2 + H^2Cl^2$	liqueur des Hollandais, (hydrogène bicarboné),
$C^4H^{10}O$	éther sulfurique,

$C^4H^{10}O + H^2O$	alcool,
$C^4H^{10}Cl^2$	éther hydrochlorique,
C^4H^8	gaz oléifiant.

Pour accorder ces deux théories, il faudrait entrer dans des développements chimiques qui ne sont pas de notre ressort ; nous avons voulu donner seulement quelques formules de composition pour montrer la difficulté qu'on éprouve à déterminer rigoureusement les éléments antagonistes dans une combinaison.

M. Dumas a cru trouver, dans un autre ordre de phénomènes, des faits de nature à changer nos idées sur la composition atomique des corps organisés. Nous voulons parler de la théorie des substitutions. C'est une question de haute philosophie chimique, dont la discussion ne saurait trouver place ici ; néanmoins, nous ne pouvons nous dispenser de faire connaître les principes sur lesquels repose cette théorie, attendu que l'étude des phénomènes électro-chimiques peut servir à fournir des arguments pour et contre. Voici les faits qui représentent ces principes :

1° Dans un composé hydrogéné, si l'on fait agir le chlore, le brome ou l'iode par chaque volume d'hydrogène enlevé et converti en acide chlorhydrique, il se fixe un volume égal de chlore, de brome ou d'iode.

C'est ainsi que l'éther $C^4H^{10}O$ donne d'abord, sous l'influence du chlore, le composé de M. Malaguti $C^4\frac{H^6O}{Ch^4}$, et plus tard le composé de M. Regnault $C^4Ch^{10}O$.

C'est encore ainsi que l'acide acétique $C^4H^6O^3$ se convertit en acide chloracétique $C^4Ch^6O^3$.

2° Quand un corps est soumis à l'action du chlore sous l'influence de l'eau, il arrive quelquefois que l'eau est décomposée, que l'hydrogène de l'eau étant converti en acide chlorhydrique, son oxygène se fixe sur la matière organique. Tel est le cas de l'indigo $C^{16}H^{10}Az^2O^2$, qui se transforme ainsi en isatine $C^{16}H^{10}Az^2O^4$.

C'est ainsi qu'il faudrait également se rendre compte de la conversion de l'alcool en aldehyde, dans la théorie qui fait de l'alcool un hydrate d'hydrogène carboné. On aurait, en effet, C^4H^8,H^4O^2, l'alcool devenant C^4H^8,O^2 aldehyde.

3° Dans quelques cas, et ce sont surtout ceux où l'oxygène agit sur le corps hydrogéné, le corps se dédouble au moment de la substitution, chaque volume d'hydrogène étant remplacé du reste par un demi-volume d'oxygène. Ainsi,

1 molécule acide formique $C^2H^2O^3$ produit
2 molécules d'acide carbonique C^2O^4.

L'oxygène est très-particulièrement disposé à produire des dédoublements de cette espèce quand il s'accumule dans un composé.

Ces faits se résument en une théorie très-simple, celle des TYPES CHIMIQUES.

L'éther et les éthers chlorés appartiennent au même type. L'acide acétique et l'acide chloracétique sont dans ce même cas. En général, les corps qui possèdent le même nombre de molécules, et qui jouissent des mêmes propriétés chimiques fondamentales, appartiennent au même type chimique.

L'indigo et l'isatine n'appartiennent pas au même type, car le dernier corps renferme de l'oxygène de plus que l'autre.

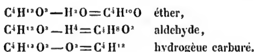
L'alcool et l'aldehyde appartiennent aussi à des types différents, puisque l'aldehyde contient de l'hydrogène de moins.

Ainsi, la théorie des substitutions résume des faits qui sont expliqués par celle des types chimiques, dont les chimistes ont tous accepté maintenant l'existence et la nécessité.

L'alcool $C^4H^{12}O^2$ sort de son type en perdant H^4 et produisant l'aldehyde $C^4H^8O^2$; mais il y rentre quand ce dernier corps se convertit en acide acétique $C^4H^8O^4$, qui appartient évidemment au même type que l'alcool.

De son côté, l'éther $C^4H^{10}O$ appartient au même type que l'aldehyde.

De sorte que le type alcool peut passer au type éther de trois manières :



$C^4H^{12}O^2 - H^2O = C^4H^{10}O$ éther,
$C^4H^{12}O^2 - H^4 = C^4H^8O^2$ aldehyde,
$C^4H^{12}O^2 - O^2 = C^4H^{12}$ hydrogène carburé.

Nous ne nous étendrons pas davantage sur la composition atomique des corps organisés, attendu, d'une part, que les idées ne sont pas définitivement fixées sur la manière dont on doit concevoir la composition en deux éléments antagonistes en chaque combinaison; et, de l'autre, que les considérations alléguées en faveur de telle ou telle opinion ne sont pas de notre ressort. Ce qu'il nous importe de connaître, c'est la constitution moléculaire, abstraction faite des moyens employés pour la déterminer; car, en effet, elle est indispensable pour étudier les propriétés physiques des corps.

M. Kopp a appliqué à la nature organique les vues que nous avons exposées, page 251, sur la constitution des combinaisons inorganiques par les volumes, c'est-à-dire, qu'il a déterminé le volume spécifique des combinaisons organiques. Comme on n'est pas certain de quelle manière les éléments sont groupés dans les molécules constitutives organiques, il a suivi une autre marche, et s'est attaché seulement à chercher, pour nous servir de ses expressions, quelques rapports entre les volumes spécifiques de combinaisons organiques analogues; et d'abord il fait remarquer que, dans la chimie organique, on trouve proportionnellement plus de combinaisons fluides que dans la chimie inorganique, et que dès lors le dimorphisme doit y être moins fréquent. Les observations sur la densité des liquides étant en général plus faciles à obtenir, doivent être plus exactes que celles relatives aux solides. A la vérité, la dilatation est plus considérable sous l'influence de la chaleur que dans les solides ; mais il y a eu égard dans ses recherches. Voici les considérations théoriques sur lesquelles s'appuie M. Kopp pour atteindre son but :

« Disposons un grand nombre de combinaisons organiques analogues dans l'ordre suivant :

$A+\alpha$	$B+\alpha$	$C+\alpha$	$D+\alpha$	.....
$A+\beta$	$B+\beta$	$C+\beta$	$D+\beta$	.....
$A+\gamma$	$B+\gamma$	$C+\gamma$	$D+\gamma$	.....
$A+\delta$	$B+\delta$	$C+\delta$	$D+\delta$	.....
.....	.....	.....	.....	.....

« Dans ce tableau, ABC représentent certaines substances ou combinaisons d'éléments invariables. A peut représenter, par exemple, l'acide hypothétique acétique anhydre, B l'acide formique, C l'acide benzoïque, etc. ; α l'eau, β l'oxyde d'éthyle, γ l'oxyde de méthyle, etc.; ou l'on peut se figurer que A est du chlore, B de l'iode, C du soufre, etc. ; α de l'hydrogène, β de l'éthyle, γ du méthyle, etc.

« Pour connaître les volumes spécifiques de toutes les combinaisons rangées dans un tel tableau, il faut seulement connaître les volumes spécifiques d'une série verticale et d'une série horizontale. Si les volumes spécifiques d'une série horizontale (ou verticale) sont connus, il suffit de connaître le volume spécifique d'une seule combinaison contenue dans une autre série horizontale (ou verticale) pour que l'on puisse en déduire les volumes spécifiques de toutes les combinaisons contenues dans cette série.

« Cette loi est de la plus haute importance. Si l'on vient à connaître les volumes spécifiques des combinaisons $A+\alpha$, $A+\beta$, $A+\gamma,\ldots$ et le volume spécifique de $B+\alpha$, on peut en déduire les volumes spécifiques des combinaisons $B+\beta$, $B+\gamma,\ldots$.

« Car la différence est toujours la même entre les volumes spécifiques

$A+\alpha$	et	$B+\alpha$	$B+\alpha$	et	$D+\alpha$	$A+\alpha$	et	$A+\delta$	....
$A+\beta$	et	$B+\beta$	$B+\beta$	et	$D+\beta$	$B\alpha+$	et	$B+\delta$	....
$A+\gamma$	et	$B+\gamma$	$B+\gamma$	et	$D+\gamma$	$C+\alpha$	et	$C+\delta$	....
....			....			....			....

« Cette loi se trouve suffisamment confirmée par l'expérience. Disposons, par exemple, les volumes spécifiques observés des combinaisons suivantes, conformément au tableau que nous venons de donner.

	A		B		C	
	Acide acétique.		Acide formique.		Acide benzoïque.	
α = Eau.	709	Mollerat	467	Liebig	?	
β = Oxyde d'éthyle......	1243	Liebig	1020	Liebig	1795	Dumas
γ = Oxyde de méthyle. ..	1012	Dumas	?		1558	Dumas

« Désignons par $(A+\alpha)$, $(A+\beta)$ les volumes spécifiques observés des combinaisons $A+\alpha$, $A+\beta$. Les observations citées confirment, en dedans des limites des fautes d'expérience, les équations suivantes, demandées par la loi que nous venons d'énoncer :

$$(A+\alpha)-(A+\beta)=(B+\alpha)-(B+\beta),$$
$$(A+\beta)-(A+\gamma)=(C+\beta)-(C+\gamma),$$
$$(A+\alpha)-(B+\alpha)=(A+\beta)-(B+\beta),$$
$$(A+\beta)-(C+\beta)=(A+\gamma)-(C+\gamma).$$

« Mais on peut démontrer encore plus évidemment la vérité de la loi générale que nous avons énoncée dans le précédent tableau, en spécialisant cette loi. Voici ce que nous voulons faire pour les combinaisons les mieux connues :

« *Le volume spécifique d'un acide hydraté* $(A+H_2O)$ *est toujours moindre de* 534 *que celui de la combinaison d'éthyle correspondante* $(A+AeO)$. » Pour démontrer l'exactitude de cette loi, M. Kopp, en calculant d'après elle la combinaison d'éthyle en prenant pour base la densité de l'acide hydraté, a cherché d'abord le volume spécifique de la combinaison d'éthyle, en ajoutant 534 au volume spécifique de l'acide hydraté.

FORMULE.	POIDS atomique.	VOLUME SPÉCIFIQUE observé.	calculé.	DENSITÉ calculée	observée.
			Hydrate et éther de l'acide acétiqoe :		
$\overline{A} + H_2O$	753	709			1,062, Mollerat.
$\overline{A} + AeO$	1107		709+534=1243	0,8906	0,89, Liebig, 15°
			Hydrate et éther de l'acide formiqoe :		
$\overline{F} + H_2O$	577	467			1,2353, Liebig, 12°.
$\overline{F} + AeO$	930		467+534=1001	0,9293	0,912, Liebig.
			Hydrate et éther de l'acide succinique :		
$\overline{S} + H_2O$	741	478			1,55, Richter.
$\overline{S} + AeO$	1094		478+354=1012	1,0812	1,036, d'Arcet.

« *Le volume spécifique d'un acide hydraté* ($A+H_2O$) *est toujours plus petit de* 300 *que celui de la combinaison de méthyle correspondante* ($A+MeO$).

FORMULE.	POIDS atomique.	VOLUME SPÉCIFIQUE observé.	calculé.	DENSITÉ calculée.	observée.
			L'acide sulfurique hydraté et le sulfate de méthyle :		
$SO_3 + H_2O$	614	332			1,85, Daltoo.
$SO_3 + MeO$	790		332+300=632	1,2511	1,324, Dumas et Péliguot 22°.
			L'acide nitrique hydraté et le nitrate de méthyle :		
$N_2O_5 + H_2O$	790	519			1,522, Mitscherlich.
$N_2O_5 + MeO$	966		519+300=819	1,1800	1,182, Dum. et Pélig., 22°.
			L'acide acétique hydraté et l'acétate de méthyle :		
$\overline{A} + H_2O$	753	709			1,063, Mollerat.
$\overline{A} + MeO$	930		766+308=1009	0,9220	0,919, Dum. et Pélig., 22°.

« *Le volume spécifique d'une combinaison d'éthyle est toujours plus grand de 234 que celui de la combinaison de méthyle correspondante.*

FORMULE.	POIDS atomique.	VOLUME SPÉCIFIQUE observé.	VOLUME SPÉCIFIQUE calculé.	DENSITÉ calculée.	DENSITÉ observée.
L'alcool et l'hydrate de l'oxyde de méthyle :					
$AeO + H_2O$	570	730			0,792, Gay-Lussac, 18°
$MeO + H_2O$	402		730—234= 496	0,8098	0,798, Dum. et Pélig., 22°.
Les sulfides d'éthyle et de méthyle :					
$Ae + S$	567	687		0,8610	0,825, Regnault, 20°.
$Me + S$	390		687—234= 453		0,845, Regnaolt, 21°.
Les iodides d'éthyle et de méthyle :					
$Ae + J_2$	1944	1012			1,6206, Gay-Lussae, 22°.
$Me + J_2$	1767		1012—234= 778	2,2712	2,237, Dum. et Pélig., 22°.
Les acétates d'éthyle et de méthyle :					
$\overline{A} + AcO$	1107	1244			0,89, Liebig, 15°.
$\overline{A} + MeO$	930		1244—234=1010	0,9213	0,919, Dum. et Pélig., 22°.
Les beuzoates d'éthyle et de méthyle :					
$\overline{B} + AeO$	1890	1794			1,0539, Domas, 10°.
$\overline{B} + MeO$	1714		1794—234= 778	1,0987	1,1, Dum. et Péligot, 17°.
Les subérates d'éthyle et de méthyle :					
$\overline{Su} + HeO$	1348	1329			1,014, Laurent, 18°.
$\overline{Su} + MeO$	1171		1329—249=1095	1,0694	1,003, Laorent, 18°.
Les mucates d'éthyle et de méthyle :					
$\overline{Mo} + AeO$	1671	1266			1,32, Malaguti.
$\overline{Mu} + MeO$	1494		1266—234=1032	1,4480	1,003, Malagnti.
Les hydrates de l'acide acétique et de l'acide formique :					
$Ae + O_4 - H_2$	753	709			1,063, Mollerat.
$Me + O_4 - A_2$	577		709—234= 475	1,2148	1,2353, Liebig, 12°.

Les résultats consignés dans ces tableaux nous montrent une coïncidence remarquable entre les densités calcnlées et ceiles obtenues par l'observation, ce qui tend à montrer l'exactitude des lois sur lesquelles M. Kopp s'est appuyé pour obtenir ces résultats. Il a trouvé que le volume spécifique des benzoates est de 538 plus grand que celui des mucates analogues : le volume spécifique des mucates est de 244 plus grand que celui des formiates analogues, etc. En sui-

vant la marche qu'il a indiquée, on peut calculer la densité de beaucoup de combinaisons, si l'on connaît bien entendu les combinaisons analogues. Quant à la substitution du chlore à l'hydrogène dans certaines combinaisons, il la formule ainsi :

« *Si dans une combinaison organique x atomes d'hydrogène sont remplacés par x atomes de chlore, le volume spécifique se trouve également augmenté de x 80.* »

M. Kopp a vérifié cette loi, en calculant la densité de plusieurs combinaisons formées par substitution, et en comparant les résultats calculés aux observations directes. Nous allons rapporter quelques-uns des résultats auxquels il est parvenu.

FORMULE.	POIDS atomique.	VOLUME SPÉCIFIQUE		DENSITÉ	
		observé.	calculé.	calculée.	observée.
Substitution du chlore dans l'hydrure de benzoïle :					
$C_{14} H_{12} O_2$	1337	1282			1,843, Liebig et Vohler.
$C_{14} H_{10} Cl_2 O_2$	1767		1282+2. 80=1442	1,225	1,196, les mêmes, 18°.
Substitution du chlore dans l'oxyde de méthyle :					
$C_2 H_4 Cl_2 O$	719	547			1,315, Regnault 20°.
$C_2 H_2 Cl_4 O$	1149		547+2. 80=707	1,626	1,606, le même.
Substitution du chlore dans l'acétate de méthyle :					
$C_6 H_{12} O_4$	930	1012			0,919, Dum. et Pélig., 22°.
$C_6 H_8 Cl_4 O_4$	3760		1012+4. 80=1332	1,344	1,261, Malaguti, 16°.
Substitution du chlore dans l'oxyde d'éthyle :					
$C_4 H_{10} O$	466	643			0,724, Gay-Lussac, 12°.
$C_4 H_6 Cl_4 O$	1326		643+4. 80=963	1,377	1,501, Malaguti.
Substitution du chlore dans l'acétate d'éthyle :					
$C_8 H_{16} O_4$	1107	1244			0,89, Liebig, 15°.
$C_8 H_{12} Cl_4 O_4$	1967		1244+4. 80=1564	1,258	1,301, Malaguti, 12°.
Substitution du chlore dans le formiate d'éthyle :					
$C_6 H_{12} O_4$	930	1020			0,912, Liebig. 15°.
$C_6 H_8 Cl_4 O_4$	1790		1020+4.80=1340	1,336	1,261, Malaguti, 16°.
Substitution du chlore dans le camphorate d'éthyle :					
$C_{14} H_{24} O_4$	1612	1566			1,029, Malaguti, 16°.
$C_{14} H_{20} Cl_4 O_4$	2472		1566+4. 80=1886	1,311	1,386, le même, 14°.
Substitution du chlore dans la benzoine :					
$C_{12} H_{1}$	985	1159			0,85, Mitscherlich.
$C_{12} H_6 Cl_6$	2476		1159+6. 80=1639	1.389	1,457, le même, 7°.

Jusqu'ici, il n'a tenu aucun compte de la température à laquelle la densité a été prise, et cependant on ne saurait se dispenser d'y avoir égard, surtout pour des liquides qui sont plus dilatables que les solides. Cette observation n'a pas échappé à M. Kopp, qui sait très-bien qu'on ne peut rigoureusement comparer les volumes spécifiques de substances différentes que pour des températures qui sont également éloignées des points d'ébullition. Il fait remarquer à ce sujet que, lorsqu'il a cherché la relation entre les volumes spécifiques des combinaisons analogues d'éthyle et de méthyle, ces substances ayant à peu près les mêmes points d'ébullition, se trouvaient dans les conditions voulues pour donner des résultats parfaitement comparables. Il n'en a pas été de même à l'égard des combinaisons produites par la substitution du chlore à l'hydrogène, dans lesquelles les points d'ébullition diffèrent beaucoup entre eux. On a dû trouver nécessairement une différence en comparant les volumes spécifiques à des distances inégales des points d'ébullition. En effet, les observations ont été faites à une température moyenne, tandis que les calculs ont été exécutés pour des températures également distantes des points d'ébullition. M. Kopp explique par là une grande partie des différences trouvées entre les observations directes et les résultats calculés.

Nous ne poursuivrons pas plus loin l'application que M. Kopp a faite de ses vues théoriques à la détermination des volumes spécifiques des substances organiques, attendu que notre but a été seulement de faire connaître l'esprit de sa méthode et les principaux résultats qu'il a obtenus.

DES MOYENS A EMPLOYER POUR OBSERVER ET ÉTUDIER LA STRUCTURE DES CORPS ORGANISÉS.

La division mécanique étant tout à fait insuffisante pour étudier la structure des corps organisés, on a recours au microscope. Quoique cet instrument soit décrit dans tous les traités de physique, nous croyons néanmoins devoir, dans l'intérêt des observateurs, en donner une description complète, en indiquant en même temps la manière de s'en servir.

Microscopes.

Le microscope dioptrique est celui dont on fait usage généralement, en raison des nombreux avantages qu'il présente; mais ne pouvant faire connaître ici tous les perfectionnements successifs apportés soit à

la construction des lentilles achromatiques, soit dans la disposition des diverses parties, nous prendrons de suite l'appareil le plus complet. Voici les principes sur lesquels repose sa construction :

Soient (pl. II, fig. 27) MN un très-petit objet placé un peu au delà du foyer d'une lentille ou objectif AB, les rayons partis des différents points de cet objet, traversant la lentille, y subissent une réfraction, et vont former au delà une image *m n*. Si l'on considère le lieu *m n* comme le foyer d'une autre lentille EF, au delà de laquelle se trouve un œil en *o*, qui verra l'objet MN suivant l'angle EOF, et par conséquent avec des dimensions considérablement augmentées; en plaçant entre l'image et l'objectif une lentille plano-sphérique GH (fig. 28), on augmente le champ de vue et l'on saisit mieux l'ensemble de l'objet; il en est de même en donnant cette forme à l'oculaire EF. Si, en outre, la lentille AB est achromatique, on a alors tous les éléments d'un bon microscope composé, que l'on rend horizontal en disposant les verres comme l'indique la fig. 29, et plaçant un prisme en P dont la face *ab* réfléchit les rayons réfractés par l'objectif AB, suivant la direction OC. L'emploi des lentilles achromatiques dans le microscope a été, sans aucun doute, une nouvelle ère pour cet instrument, puisqu'elles permettent de voir les objets nettement et sans couleur.

Sans remonter jusqu'à Euler, auquel on attribue la première idée de ce grand perfectionnement, nous dirons que Charles, le docteur Brewster, Frauenhoffer, Selligues, Vincent et Charles Chevalier, Tulley et Amici, ont contribué chacun à la construction des lentilles achromatiques servant d'objectifs au microscope. Charles Chevalier construisit d'abord des lentilles achromatiques de neuf millim. de foyer, quatre millim. de diamètre et deux millim. au centre. Ces dimensions permirent de superposer plusieurs lentilles, afin de détruire l'aberration de sphéricité. M. Tulley en construisit de $\frac{2}{10}$ p. (anglais) de foyer. M. Amici en fit d'autres de trois lentilles superposées, de treize millim. de foyer, et ayant une large ouverture. Les trois lentilles superposées dont on se sert aujourd'hui, et qui donnent les plus fortes amplifications, sont représentées pl. II, fig. 29 et 30. La lentille AB est composée de deux lentilles A et B; la première est bi-convexe et en *crown-glass;* la seconde est une lentille concave en *flint-glass*. La position horizontale qu'on donne au microscope, et dont l'idée est due à M. Amici, est le grand perfectionnement qu'on ait fait apres l'introduction d'un objectif achromatique; car auparavant, lorsque les observations se prolongeaient, on éprouvait une fatigue dans les muscles du cou et une accumulation de fluide sur la cornée,

qui forçaient bientôt l'observateur à cesser : quelques personnes préfèrent cependant une inclinaison de 45°. M. Amici, en adaptant des oculaires de rechange pour varier les amplifications, en a augmenté et facilité l'usage. Tels sont les principes généraux qui servent de base aujourd'hui à la construction des microscopes dioptriques. Nous allons maintenant décrire le microscope universel de Ch. Chevalier, qui réunit les avantages que nous venons d'indiquer, et qui est, en outre, muni de tous les accessoires nécessaires pour son emploi.

L'appareil doit être pourvu de vis de rappel, pour imprimer des mouvements lents aux diverses parties mobiles, telles que la platine, que l'on mouvait jadis avec une crémaillère. Enfin, la construction doit être telle que les mouvements de l'appareil, soit verticaux, soit latéraux, ne nuisent pas au centrage et à la solidité. Des butoirs doivent être placés de manière à limiter les mouvements et à déterminer exactement la position des différentes pièces, lorsqu'on les replace dans leur position primitive. L'appareil complet est représenté pl. II, fig. 31 ; il est vissé sur la boîte dans laquelle on le serre ordinairement, et qui est pourvue de compartiments pour recevoir toutes les pièces dont nous parlerons ci-après. L'oculaire est à la hauteur de l'œil ; l'appareil se compose des pièces suivantes :

A, boîte ;

B, tiroir ;

CC, colonne de support mobile ;

D, pièce en cuivre horizontale, articulée avec la colonne, au moyen de la charnière E, et à laquelle est fixée en D la tige carrée F dont la face postérieure est garnie du haut en bas d'une crémaillère ; cette tige est fixée à la colonne par le bouton G ;

H, miroir concave ;

I, miroir plan sur la face opposée ;

K, bouton qui permet de faire tourner le miroir dans le demi-anneau en cuivre L, qui jouit lui-même d'une mobilité latérale sur la boîte M ;

N, bouton qui fait courir cette boîte sur la crémaillère de la tige ;

O, pignon moteur de la boîte P ;

Q, vis de rappel à boule destinée à imprimer à la platine un mouvement insensible pour placer l'objet exactement au foyer ;

R, corps de l'instrument mobile en deux sens : 1° horizontalement, sur la pièce *a* ; 2° verticalement, au moyen de la charnière *c*. A son extrémité S se placent les verres oculaires, et tout l'intérieur du tube est garni de velours noir ;

S, oculaire;

T, tube qui s'allonge et se raccourcit au moyen d'une crémaillère et du pignon U. On a tracé sur ce tube une échelle qui permet d'apprécier l'allongement;

V, tube fermé à son extrémité, et portant à son intérieur le prisme réflecteur fixé par le petit bouton *b*. Ce tube est joint au corps R, au moyen d'un assemblage à baïonnette;

X, tube porte-lentille;

Y, lentilles;

Z, platine mobile et ses accessoires.

Quand on veut se servir de l'appareil, on commence par le placer dans une position horizontale, de manière que l'oculaire soit à la hauteur de l'œil. On pose l'objet à observer sur la platine, et l'on choisit l'objectif et l'oculaire qui conviennent aux observations que l'on se propose; on fait ensuite parcourir un quart de révolution aux pièces V X, et l'on met en place les lentilles Y. La pièce X est remise dans sa position primitive, et, en regardant dans l'oculaire, on règle l'éclairage, puis on place l'objet au foyer de l'objectif, au moyen du pignon O et de la vis de rappel Q, et l'on perfectionne l'éclairage. L'amplification peut être augmentée de trois manières : 1° en changeant l'objectif; 2° en allongeant le tube T, sans changer les lentilles; 3° en conservant l'objectif et en changeant l'oculaire.

Il est facile de donner au microscope une position verticale (pl. II, fig. 31). On enlève les pièces V X de la fig. 31, que l'on remplace par la pièce V, fig. 31, et l'on fait tourner le corps de l'instrument sur la charnière.

Quand on veut observer des effets chimiques, on emploie les dispositions adoptées fig. 33 et 34. On fait parcourir une demi-révolution à la pièce VX, afin que la face plane des lentilles étant tournée vers le plafond, l'on n'ait pas à craindre que les substances placées sur la platine se déposent sur la lentille, et empêchent de voir les effets que l'on veut observer. Le microscope ainsi disposé permet également d'observer les précipités chimiques. Voici la description des diverses pièces employées dans ce genre de recherches :

d est l'anneau qui glisse à frottement sur la pièce X;

e est une tige carrée adhérente à l'anneau, et unie, au moyen d'un pivot, à la seconde tige *ef;*

g, un miroir dont la surface réfléchissante est tournée en avant et en bas;

h, diaphragme variable;

i, boite mobile sur la tige *f*, au moyen d'une crémaillère et du pignon *k*;

l, porte-objet vu la face dans la fig. 34;

l l', plaque en cuivre percée dans son centre, exactement au-dessus de l'objectif;

m, *m*, lampes à l'esprit-de-vin qui se meuvent à frottement sur les deux broches *nn*;

o, capsule en verre qui se place sur l'ouverture de la plaque *l'*, *l'*.

Quand on veut employer l'action de la chaleur, on allume les deux lampes qui échauffent graduellement les plaques, et par suite la capsule.

Le microscope ainsi disposé sert à observer les animalcules qui ne surnagent pas à la surface des liquides, ainsi que la circulation des liquides dans divers animaux. Outre tous ces avantages, l'appareil pouvant servir aussi de microscope cato-dioptrique, M. Ch. Chevalier a cru devoir le nommer *microscope universel.*

Nous n'avons plus qu'à indiquer divers accessoires, tels que les pièces relatives à l'éclairage des objets transparents et opaques, à la *camera lucida*, et au micromètre destiné à mesurer les dimensions réelles des objets.

Les corps transparents ne l'étant pas tous au même degré, il s'ensuit que pour les voir par transparence au microscope, il faut les éclairer convenablement, soit avec la lumière directe, soit avec la lumière réfractée ou réfléchie. Examinons successivement chacun de ces trois modes d'éclairage. La lumière directe qu'on emploie est celle du soleil ou d'une bougie; mais ce mode n'est pas le plus avantageux, attendu que l'on a ou trop ou pas assez de lumière, ou une lumière vacillante qui fatigue l'observateur. La lumière réfléchie est celle dont on fait usage ordinairement. On place le microscope de manière que la lumière, arrivant par une fenêtre, vienne tomber sur un miroir attenant à l'appareil, et qui la réfléchit sur l'objet. Autant que possible, la lumière doit être réfléchie elle-même par un mur blanc placé à peu de distance de la fenêtre.

Si l'on fait usage de la lumière artificielle, on entoure la lampe d'un réflecteur parabolique qui renvoie tous les rayons sur le miroir. Quand la lumière est directe, elle doit former avec le réflecteur un angle de 45°, et n'être inclinée ni d'un côté ni de l'autre; ensuite, on place le miroir de manière à ce qu'il éclaire le plus possible l'objet. L'expérience a démontré que l'éclairage avec une lampe n'est parfaitement convenable que lorsque la distance de la lampe au miroir est

égale à celle du miroir à l'objet. Pour éviter l'inconvénient de regarder d'un œil, l'autre restant fermé, on se sert du disque de M. Amici, qui est simplement un carton noirci, percé à son centre d'une ouverture qu'on applique sur l'oculaire. Lorsqu'on a à observer un objet très-transparent, comme une trop grande lumière le rendrait à peu près invisible, on emploie des diaphragmes. Quelques essais suffisent pour adopter celui qui convient le mieux. Dans le cas où le miroir réfléchit encore trop de lumière, on place dessus, un disque de carton blanc ou de plâtre de modeleur, ou un morceau de papier huilé. Pour avoir de la lumière plus ou moins forte, on dispose le réflecteur de manière qu'une des surfaces soit concave et l'autre plane; celle-ci ne sert que lorsque la lumière est trop vive.

En inclinant plus ou moins le miroir quand l'objet a des saillies, on fait naître des ombres qui servent à mieux faire connaître la forme de l'objet. Jusqu'ici il n'a été question que de l'éclairage au moyen de la lumière diffuse et artificielle; nous allons montrer comment il faut agir quand on veut se servir de la lumière solaire. Il est reconnu que l'intensité de la lumière qu'on doit fournir à l'objet doit être en raison inverse du pouvoir amplifiant. On conçoit, en effet, qu'il est des circonstances où il est nécessaire d'employer les rayons directs du soleil; mais comme on a toujours des moyens de modérer la lumière la plus forte, il s'ensuit qu'en usant de celle-ci on peut, en la ménageant convenablement, arriver à la faire servir pour voir les corps les plus faibles.

Il arrive aussi qu'on fait usage, dans le cas où l'on emploie les plus fortes lentilles, d'une pièce formée de verres colorés, au moyen desquels on parvient à empêcher l'action d'une lumière trop vive sur l'œil; cette pièce est vissée au-dessus des lentilles. Quant à l'éclairage proprement dit, on emploie la lumière directe ou la lumière réfléchie, mais la dernière est celle généralement adoptée. Le mode d'éclairage a provoqué de nombreuses recherches de la part des physiciens. Œpinus employa une lentille avec laquelle il concentrait les rayons réfléchis par un miroir plan; mais comme la lumière n'arrivait alors que dans une seule direction, il s'ensuivait que l'objet n'était éclairé qu'imparfaitement. M. Brewster proposa, en 1820, la décomposition de la lumière dans le prisme et les verres colorés, puis de faire arriver la lumière soit du soleil, soit d'une lampe à travers quatre ouvertures garnies de lentilles, afin d'éclairer l'objet de quatre côtés différents. Ce mode ne fut pas adopté.

Wollaston (*Ph. Trans.* 1829) proposa un miroir plan pour diriger

la lumière, et une lentille d'assez grande dimension, plane d'un côté et convexe de l'autre, la face plane tournée vers l'objet qu'on voulait éclairer. Le docteur Brewster construisit l'appareil suivant d'après les principes du docteur Wollaston. Soient (pl. II, fig. 35) *mn* le porte-objet, PQRST un tube de quatre à cinq centimètres de long et tapissé de noir. A la surface de ce tube, qui est mobile dans tous les sens, se trouve une ouverture ST. Dans l'intérieur du tube on dispose un assemblage de deux lentilles appelé *doublet achromatique*, et dont le foyer est d'environ de quatorze à vingt-huit millimètres. En faisant mouvoir ce doublet, au moyen d'une crémaillère, on amène le foyer F des rayons parallèles en un point du plan MN. Au-dessous du doublet se trouve un plan LMN qui réfléchit sur le doublet les rayons qui pénètrent par l'ouverture ST. La flamme est placée en S'; à peu de distance se trouve un pied qui supporte un écran percé d'ouvertures de diverses grandeurs. On peut, au besoin, se servir d'un second doublet achromatique sans aberration, quand on veut une lumière plus vive.

Passons à l'éclairage des objets opaques. On emploie encore, comme précédemment, la lumière directe réfléchie ou réfractée. Dans le premier cas, on place le microscope de manière que l'objet soit exposé à la lumière venant d'une croisée ou d'une lampe, et le plus près possible de l'objet, de sorte néanmoins que l'œil n'en soit pas affecté. On peut ainsi, avec de faibles grossissements, reconnaître la couleur et la forme extérieure de quelques corps. L'emploi de la lumière réfractée se fait à l'aide d'une loupe plane ou convexe, telle que l'on puisse produire sur l'objet une image nette du point lumineux d'où émanent les rayons. On éclaire, aussi bien que possible, les objets opaques avec un réflecteur concave en verre, au centre duquel se trouve la lentille, de sorte que le foyer de l'un correspond au foyer de l'autre. M. Charles Chevalier a disposé ainsi la pièce nécessaire pour éclairer convenablement les objets opaques :

« On enlève la pièce qui porte les diaphragmes pour laisser une large ouverture à la platine. Le réflecteur, garni de sa lentille, est fixé à l'extrémité située vers l'objectif du microscope, et le miroir inférieur incliné de manière à réfléchir les rayons lumineux à travers cette ouverture. Arrivés au réflecteur concave, les rayons sont de nouveau réfléchis, et vont se réunir à son foyer dans le même plan que l'objet ; pour tenir celui-ci au foyer de la lentille, on emploie avec beaucoup d'avantage le petit appareil représenté (pl. II, fig. 36). » Quand le corps présente des saillies très-brillantes, on recouvre le mi-

roir inférieur d'un papier huilé, ou d'un carton blanc; ou bien on se sert du réflecteur mobile qui permet de varier le foyer et de faire tomber sur l'objet la quantité de lumière dont on a besoin. On se sert préférablement de la lumière artificielle, et on emploie pour ce mode d'éclairage des lentilles du plus fort grossissement.

Des micromètres.

Quand on veut se servir du microscope pour détermiuer la constitution des corps, il faut avoir à sa disposition d'excellents micromètres, afin de pouvoir mesurer les dimensions des diverses parties de ces corps.

Les micromètres sont des lames de verre sur lesquelles sont tracées, à l'aide d'un diamant et d'une machine à diviser, un grand nombre de divisions sur une très-petite étendue. On est parvenu à diviser un millimètre en cinq cents parties. Mais aujourd'hui on peut se passer de divisions aussi fines; il suffit, pour en obtenir de très-petites, de reculer la mire convenablement.

Les micromètres sont ordinairement fixés dans l'ouverture d'une règle en cuivre, comme on le voit fig. 37, pl. II. Il y a deux choses à considérer dans le micromètre : le grossissement du microscope et la grandeur réelle des objets. Occupons-nous d'abord de la détermination du grossissement, et prenons, pour plus de simplicité, le microscope solaire. On place un écran à une distance de $0^m,25$, et on introduit dans le porte-objet un micromètre, dont l'image va se peindre sur l'écran. On mesure alors avec un compas la grandeur d'une de ces parties, et l'on a ainsi le pouvoir amplifiant de la lentille. On suit la même méthode pour évaluer le grossissement du microscope simple. Supposons que l'on prenne un microscope horizontal auquel on adapte la chambre claire horizonto-verticale de M. Amici; on place le papier à $0^m,25$ de l'axe de la lentille, et sur la platine un micromètre en centièmes de millimètre. On marque sur le papier deux points correspondants à une ou plusieurs divisions amplifiées du micromètre, et par la comparaison, et de la distance entre les deux points, et du nombre de divisions, on déduit le pouvoir amplifiant de la lentille.

Cette méthode n'est applicable qu'au microscope auquel on peut faire prendre la position horizontale; mais quand cela ne peut avoir lieu, on modifie le procédé de la manière suivante : on place encore à $0^m,25$ de l'axe, et à la hauteur de la lentille, un tableau recouvert d'une feuille de papier blanc; on pose sur la leutille le miroir percé

d'Amici, et l'on dirige sa surface réfléchissante vers la mire; on met alors le micromètre sur la platine, et l'on regarde par l'ouverture centrale du miroir. On voit en même temps la mire et les divisions amplifiées du micromètre qui semblent tracées sur le papier. Si l'on prend sur l'écran la distance d'une ou de plusieurs divisions du micromètre avec un compas, on n'a plus qu'à comparer cette distance aux divisions de l'échelle micrométrique, et on obtient facilement le rapport cherché. Au surplus, pour trouver la grandeur réelle d'un objet, on n'a pas besoin de déterminer d'abord le pouvoir amplifiant du microscope. En effet, s'il s'agit du microscope simple horizontal, on dispose l'appareil comme pour mesurer l'amplification, et, après avoir dessiné sur le papier l'image amplifiée du micromètre qu'on enlève, on met sur la platine l'objet à mesurer, et l'on compare son amplification avec l'échelle obtenue précédemment.

Si les objets à mesurer sont excessivement petits, il faut employer des divisions très-fines; mais alors il serait difficile de les voir à l'œil nu; pourtant on ne pourrait avoir une évaluation exacte. Dans ce cas, il faut opérer de la manière suivante : le microscope est disposé comme ci-dessus; mais, comme on n'a plus à déterminer le grossissement de la lentille, on ne place plus le papier à une distance de la lentille, égale à $0^m,25$, mais bien à la véritable distance. Supposons que celle-ci soit de $0^m,50$, que le micromètre de la lentille soit divisé en centièmes de millimètre, et que le pouvoir amplifiant de la lentille soit de cent fois; si le papier était placé à $0^m,25$, un centième de millimètre correspondrait sur le papier à un millimètre; à la distance de $0^m,50$, un centième de millimètre correspondra à deux millimètres. On retire le micromètre, on met à la place l'objet à mesurer, et rien n'est plus facile ensuite que de connaître la grandeur réelle d'une de ses parties, lors même qu'elle ne serait que de $\frac{1}{500}$ de millimètre, car aussitôt que l'on a sur le papier une image de $\frac{1}{100}$ de millimètre, on peut la diviser en cinq ou dix parties. On trouve de grands avantages à opérer ainsi; car deux millimètres sont plus faciles à diviser qu'un seul. Nous nous bornons à indiquer ici la méthode générale, attendu que l'habitude d'observer fera connaître la modification qu'on devra y apporter dans les cas particuliers. Occupons-nous maintenant de la mesure de l'amplification et de la grandeur réelle des objets dans le microscope composé, soit horizontal, soit vertical. Commençons par le pouvoir amplifiant dans le microscope horizontal. On fixe d'abord la camera lucida d'Amici sur l'oculaire, appareil dont nous donnerons ci-après une description détaillée; on place sur la pla-

tine un micromètre objectif, et sur la table à $0^{m},25$ de l'axe de l'instrument une feuille de papier sur laquelle sont tracés au crayon deux traits correspondant à une ou plusieurs divisions du micromètre. On mesure l'intervalle avec un compas, et on le compare aux divisions d'une échelle métrique. Le rapport des divisions avec celles du micromètre donne le grossissement du microscope, c'est-à-dire, de l'objectif. Il s'agit maintenant d'avoir le grossissement de l'objectif et du verre de champ réunis. A cet effet, on enlève la camera, on place sur la platine un micromètre, on met au point, et l'on cherche à faire concorder les divisions inférieures avec les supérieures, en faisant tourner la pièce de l'oculaire, ou bien en manœuvrant le support du chariot. On suit la même marche pour mesurer l'amplification du microscope vertical. La mesure de la grandeur réelle des objets est donnée avec une grande facilité pour les deux espèces de microscopes. On dispose le microscope horizontal comme s'il s'agissait de mesurer le grossissement; seulement on éloigne le papier le plus possible, afin d'avoir une échelle qui représente une amplification considérable subie par le micromètre. Quand on n'use pas de la chambre claire, on remplace le micromètre objectif par l'objet lui-même, et son rapport avec le micromètre oculaire donne la mesure de sa grandeur réelle. Quant au microscope vertical, la mesure de la grandeur des objets ne présente aucune difficulté.

La CAMERA LUCIDA *appliquée au microscope.*

Elle est destinée, comme on sait, à dessiner les objets soumis au microscope; or, dès l'instant qu'elle reproduit avec exactitude ces objets, elle peut servir également à les mesurer; c'est sous ce point de vue que nous allons en donner ici la description; mais, en vue du but que nous nous proposons, nous ne décrirons que celle qui peut être appliquée au microscope.

Il y a trois espèces de *camera lucida :* la première, due à Wollaston; la deuxième, à Sœmmering, et l'autre à Amici. Celles de Wollaston et de Sœmmering sont connues, et nous n'en ferons pas mention ici. Nous ne parlerons que de celle de M. Amici, que l'on peut adapter au microscope de Ch. Chevalier; elle est représentée pl. II, fig. 38.

V est l'oculaire du microscope.

M est un miroir plan métallique percé au centre d'une petite ouverture qui correspond exactement à celle de l'oculaire.

P un prisme rectangulaire destiné à réfléchir en C les rayons arri-

vant du papier; enfin, O est la position de l'œil. Dès l'instant que l'œil est appliqué à l'ouverture du miroir M, on voit, d'une part, l'objet amplifié par le microscope, et, de l'autre, l'image de la main ou du crayon, qui semble se porter sur l'objet pour le reproduire, attendu que le prisme agit sur les rayons partis du point C pour les renvoyer en *m* sur le miroir plan qui les réfléchit suivant la direction *m o*. Cette *camera* s'applique très-facilement au microscope horizontal; quand on veut s'en servir pour le microscope vertical, on fait subir à l'appareil une modification convenable : celle qui est indiquée par M. Ch. Chevalier parait avantageuse. On pose sur l'oculaire le miroir percé fixé sur un disque en cuivre, à une certaine distance du microscope, et à la même hauteur que le miroir; on ajuste le prisme rectangulaire, parallèlement au papier sur lequel on veut dessiner; le reste se fait comme ci-dessus.

On fait usage dans la micrométrie d'un grand nombre de petits accessoires, dont on trouvera la description dans le *Manuel complet de micrographe* de Ch. Chevalier; mais il en est un dont nous ne pouvons nous dispenser de parler, c'est le goniomètre pour mesurer les angles des objets microscopiques. La première idée en est due à M. Raspail; elle a été appliquée ensuite par M. Lebaillif à la construction du petit appareil (fig. 39, pl. II).

Cet appareil est fixé dans l'oculaire A B au foyer du verre supérieur. Il est représenté en plan en CC, et se compose d'un cercle de cuivre *cc*, dans lequel tourne le disque D D, percé au centre d'une ouverture circulaire O, dans laquelle on place un disque de verre sur lequel est tracé au diamant un trait *ac*.

La circonférence du cercle D D est divisée, et le bouton F est terminé par un pignon qui permet de faire tourner DD. On fixe sous la pièce *c c* un second disque de verre, sur lequel est tracé au diamant le trait *b d*. On commence par faire accorder les traits des deux disques; si l'on tourne le bouton F, on communique le mouvement à la pièce D. Les traits se coupent alors suivant des angles que l'on peut mesurer au moyen des degrés tracés sur le cercle *c*.

—

CHAPITRE IV.

Structure et constitution des végétaux.

Les corps inorganisés se présentent à nous sous mille aspects divers, et ce n'est que rarement que nous les voyons à l'état de cristaux ou formes polyédriques à faces planes, plus ou moins semblables aux polyèdres de la géométrie. Quoiqu'il soit très-difficile de connaître les causes qui concourent à la formation des cristaux, cependant il est possible de découvrir, au moyen du clivage, les lois générales qui président à leur structure, tandis qu'on est beaucoup moins avancé à l'égard des corps organisés, dont la constitution, étant plus complexe, doit nous occuper maintenant. Commençons par les végétaux, d'une organisation plus simple que celle des animaux; on n'y trouve pas, à beaucoup près, la même régularité que dans les cristaux; leurs surfaces ne sont plus terminées par des faces planes; leurs formes sont plus ou moins arrondies; la régularité, en outre, n'est qu'apparente, car il est impossible de trouver une fleur dont les pétales soient parfaitement égaux, et une feuille présentant une identité parfaite des deux côtés. On ne peut néanmoins s'empêcher de reconnaître une symétrie de composition et de structure, soit dans les pétales, soit dans les deux parties d'une feuille. C'est en raison de cette symétrie, plus ou moins parfaite, que l'on est amené à considérer les végétaux comme des corps régulièrement organisés. Il se produit dans les végétaux, comme dans les cristaux, des irrégularités dépendantes de phénomènes particuliers, soumis à une marche constante, comme les monstruosités nous en offrent de nombreux exemples.

On reconnaît à la première inspection qu'un végétal, pourvu de tous ses organes, est composé d'une tige, de branches ou rameaux pourvus de feuilles, de fleurs ou de fruits, suivant la saison, et, si on l'isole de terre, de racines qui se ramifient en une infinité de radicules de plus en plus petites, de même que les branches se divisent en rameaux. On doit analyser chacune de ces parties, si l'on veut en connaître la structure, ainsi que les éléments dont elle se compose. Mais tous les végétaux ne présentent pas ces parties développées au

même degré; il y en a qui ne nous en montrent que les rudiments; de là, la division des végétaux en classes, en genres, en espèces et en familles. On distingue deux grandes classes : les végétaux cellulaires, ou acotylédones, suivant Jussieu, ou agames, suivant Lamarck, et les végétaux vasculaires ou phanérogames. Les premiers sont composés d'un tissu cellulaire arrondi ou allongé; les seconds d'un tissu cellulaire et de vaisseaux. Les phanérogames sont eux-mêmes partagés en deux grandes classes fondamentales : les dicotylédones ou exogènes, les monocotylédones ou endogènes. Occupons-nous seulement des derniers, en raison de leur état plus ou moins parfait, et décrivons rapidement les diverses parties qui les composent, particulièrement celles dont nous aurons besoin dans l'étude de la physique appliquée à la physiologie végétale.

La tige des végétaux vasculaires est la partie fondamentale; elle s'élève verticalement, quand aucune cause perturbatrice ne vient la dévier de cette direction. A sa partie supérieure se trouvent les branches et les feuilles, organes respiratoires; à la partie inférieure, les racines qui prennent au sol, par l'intermédiaire des spongioles, les éléments nécessaires à la nutrition. La tige est plus ou moins bien développée; quelquefois, elle est rabougrie ou cachée dans la terre, comme les plantes bulbeuses, dont la tige n'est autre que le plateau orbiculaire qui fait la base de l'oignon, et d'où partent, d'un côté, les racines, et, de l'autre, les feuilles et les fleurs. Tous les végétaux vasculaires sont donc munis d'une tige, qui se réduit dans le cas extrême à un plan. La tendance à la verticalité (dont nous aurons à nous occuper en parlant de l'action de la pesanteur sur la végétation) ne manque que dans quelques parasites, tels que le gui, et qui, ne vivant que de la séve préparée et élaborée par d'autres végétaux, se contournent pour prendre leur nourriture partout où ils la trouvent. On distingue dans la tige le tronc, partie principale, les branches affectant une direction verticale beaucoup moins constante, et garnies ordinairement de feuilles et d'écailles, quand celles-ci manquent. Les points de jonction de la tige et des racines constituent le collet.

Les feuilles partent ordinairement de nœuds qui se trouvent de distance en distance sur les tiges (fig. 1, pl. III), et paraissent être formées de *plexus*, de fibres, comme on le voit dans les graminées. Les tiges, ainsi que les branches, se terminent en général par des parties vertes, molles, herbacées. Il y a des végétaux dont les tiges sont composées, en grande partie, de cette substance verte; on les appelle alors plantes herbacées, *herbe*. Leur existence est bien plus courte que celle des

autres végétaux; en général, elles périssent au bout d'un an, ou bien, la tige morte, il repousse du collet de la racine d'autres tiges l'année suivante.

Les tiges des végétaux qui vivent plusieurs années, et qu'on nomme en raison de cela *plantes vivaces*, ont plus de consistance, et sont plus dures que les précédentes. Dans les plantes vivaces, on distingue 1° les tiges charnues, dont la partie externe est recouverte d'un parenchyme vert très-développé; 2° les tiges ligneuses ayant la consistance et l'apparence du bois. Les végétaux de cette dernière catégorie sont divisés en sous-arbrisseaux, en arbustes et en arbres. Bien que les tiges affectent ordinairement la verticalité, elles s'inclinent néanmoins quand elles sont trop faibles. Si elles ne peuvent se redresser, et qu'elles se courbent jusqu'à ce que leur sommet touche la terre, elles y prennent racine, comme les plantes grasses en sont un exemple. Souvent il arrive que les tiges qui ne peuvent se soutenir elles-mêmes sur le sol, prennent pour point d'appui les corps qui se trouvent à leur portée; telles sont les plantes rampantes. Les branches ou rameaux dont les tiges sont pourvues vont en divergeant, et portent des feuilles et des fleurs; elles naissent de l'aisselle des feuilles, ou très-près, et tendent également à suivre la verticale; mais au fur et à mesure qu'elles grandissent, elles tendent à prendre la direction horizontale, tant à cause de leur poids que parce que leurs extrémités se dirigent vers le bas pour chercher la lumière. Les branches inférieures étant les plus anciennes, sont naturellement les plus longues. Il existe un tel rapport entre les branches et les racines, qu'une grosse branche correspond à une grosse racine; et que lorsqu'une racine pivotante perd son pivot, la maîtresse tige cesse de s'élever, et pousse des branches latérales.

Pénétrons successivement dans l'intérieur de la tige des dicotylédones et des monocotylédones.

Dans la tige des dicotylédones, on trouve deux parties distinctes : le corps ligneux, placé au centre, et le corps ou système cortical, qui enveloppe le corps ligneux, et que l'on nomme *écorce*. Dans chacune de ces parties, on remarque deux portions distinctes placées en sens inverse l'une de l'autre : la partie parenchymateuse, la moelle, occupant le centre, et la partie fibreuse composée du bois et de l'aubier, et disposée par couches autour du parenchyme. Dans l'écorce, la partie parenchymateuse, ou la moelle corticale, appelée *enveloppe cellulaire*, se trouve à l'extérieur, tandis que la partie fibreuse, qui comprend les couches corticales et le liber, est à l'intérieur. Il y a

donc inversion dans la place qu'occupent la moelle corticale et les parties fibreuses qui ont de l'analogie dans leur composition.

La tige des monocotylédones diffère de la précédente, en ce qu'elle ne présente seulement qu'une masse homogène, au lieu de deux corps différents qui croissent en sens inverse. De plus, elle n'a jamais de canal médullaire, ni de rayons médullaires distincts; les fibres ligneuses nouvelles et anciennes sont entremêlées depuis le centre jusqu'à la circonférence, et ne forment pas de couches régulières. La fig. 2, pl. III, représente la coupe transversale d'une branche de l'asclepias fructicosa : *a* écorce, *b* moelle, *d* vaisseau poreux, *e* vaisseaux propres réunis en faisceaux. La fig. 3, coupe transversale et longitudinale d'un tronc de chêne commun : *a* l'écorce, *b* aubier, *c* autre masse de jeune bois, *d* canal médullaire réduit par le refoulement successif des couches du bois en simples pointes ; fig. 4, pores simples de l'épiderme ; fig. 5, pores membraneux.

Les racines sont les parties de la plante qui se dirigent vers la terre; elles se distinguent des tiges, en ce qu'elles ne croissent pas, lors même qu'elles sont exposées à l'air, à l'exception cependant de leurs extrémités, ou spongioles, véritables tissus destinés à produire l'ascension de la séve dans la plante. Les racines diffèrent des tiges, en ce qu'elles n'ont ni trachées, ni stomates. Des coupes transversales pratiquées dans les racines présentent les mêmes parties que celles effectuées dans les tiges, si ce n'est que les racines des dicotylédones manquent de moelle. La plupart des racines se ramifient, soit latéralement, soit par leurs extrémités, en une multitude de fibrilles très-menues, dont l'ensemble constitue le chevelu. C'est à l'extrémité de ces fibrilles que se trouvent les spongioles. On voit, fig. 6, pl. III, une racine pivotante avec des rameaux articulés.

Les feuilles attirent particulièrement l'attention des botanistes, en raison du rôle important qu'elles jouent dans la végétation ; elles sont les organes de la respiration, de l'évaporation aqueuse et de la décomposition des sels et des sucs. La feuille se compose des parties suivantes : le pétiole ou queue de la feuille est le filet qui, partant de la tige, forme un faisceau peu ou point étalé, appelé limbe. Ce limbe est la portion où les fibres sont plus ou moins divergentes ; on y distingue les nervures ou faisceaux de fibrilles qui en forment le squelette, et se divisent en primaires, secondaires, tertiaires. Entre les nervures se trouve un intervalle rempli par le parenchyme, qui n'est autre qu'un tissu cellulaire. Si l'on examine le limbe suivant une coupe transversale, on reconnaît trois parties distinctes : 1° la face supérieure ; 2° la

face inférieure; 3° l'espace intermédiaire rempli d'un organe appelé *mésophylle*, lequel constitue réellement le corps de la feuille. En effet, le mésophylle renferme, suivant toutes les apparences, deux systèmes très-importants; le premier, recevant la sève ascendante, la conduit au contact de l'air pour son élaboration, et permet l'exhalation des parties surabondantes, tandis que le second reçoit la sève élaborée, et la reconduit dans la tige pour servir à la nutrition. Quant aux deux surfaces de la feuille, elles ne sont que des cuticules destinées à garantir le mésophylle, et peuvent être enlevées facilement dans les plantes où le tissu cellulaire est abondant. Elles sont souvent très-différentes; la supérieure a un aspect plus uni que l'inférieure; elle a moins de poils, et manque souvent de stomates, qui ne sont autres que les orifices de la cuticule. Chaque surface paraît jouer un rôle spécial, car si l'on retourne une feuille, elle ne tarde pas à reprendre sa position primitive, lors même que l'on y met obstacle. La fig. 7, pl. III, représente une feuille réduite au simple tissu ligneux, afin de bien faire connaître la manière dont il s'anastomose dans les végétaux pour en former en quelque sorte la charpente.

Après les feuilles viennent naturellement les organes reproducteurs, qui sont à l'extrémité des tiges. Tous les corps organisés, végétaux ou animaux, sont reproduits par un germe qui est en quelque sorte le corps lui-même en miniature, ou une portion de ce corps. Deux opinions contradictoires divisent depuis longtemps les physiologistes, et les diviseront peut-être longtemps encore. Les uns pensent que les germes sont formés par les organes reproducteurs, les autres admettent qu'ils sont préconçus, et font remonter par conséquent leur origine à la création des êtres. Suivant cette dernière opinion, tous les germes auraient été emboîtés les uns dans les autres, et se détacheraient successivement dans le cours des siècles jusqu'à l'infini. Les germes se présentent sous deux états différents: tantôt ils se développent suivant les lois de la nutrition, comme les branches, les tubercules, les caïeux, les marcottes ou les boutures en sont des exemples, tantôt ils sont le résultat d'une fécondation qui s'opère dans un appareil composé d'organes dont la réunion forme la fleur.

Toutes les plantes ne sont pas pourvues d'organes sexuels bien apparents; celles qui en possèdent sont appelées *phanérogames*, et celles qui paraissent en être privées *cryptogames*. Dans les phanérogames, la fleur est portée sur un rameau ou pédicelle de longueur variable suivant l'espèce. Les pédicelles prennent naissance, soit immédiatement sur la tige, soit sur des parties de celle-ci ou des bran-

ches; on appelle *pédoncules* ces branches ou tiges florales. Les feuilles florales sont celles dont l'aisselle émet un pédicelle. On les nomme *bractées* lorsqu'elles diffèrent des feuilles ordinaires par la grandeur, la couleur, la forme, la consistance. Les bractées doivent être considérées comme servant à protéger les parties de la fleur et à les nourrir. Sans entrer dans un examen détaillé de toutes les parties des organes qui constituent une fleur, nous dirons qu'on distingue les pistils et les étamines, organes de la fécondation. Les premiers renferment les ovules, et sont par conséquent les organes femelles; les secondes élaborant la liqueur séminale, constituent les organes mâles. Les étamines sont libres (fig. 9) ou soudées, monadelphes (fig. 10). La corolle est monopétale ou polypétale (fig. 11, 12), de même nature que ces organes, les enveloppe immédiatement et les protége. Le calice, de nature foliacée, leur sert de tégument externe. Il est monophylle ou feuilles soudées, ou polyphylle ou feuilles libres (fig. 13 et 14). Le *torus* sert de base commune à la corolle et aux étamines; nous ne devons pas omettre non plus l'axe ou prolongement du pédicelle. Le pistil (fig. 8) se compose du stigmate *a*, du style *b*, de l'ovaire *d*, des ovules *c*. Ces organes sont composés eux-mêmes de parties diverses, parmi lesquelles il y en a plusieurs qui jouent un rôle important dans les phénomènes de la nutrition.

L'étamine est composée d'un filet et d'une anthère. Le filet a tantôt une forme cylindrique, tantôt une forme prismatique grêle très-allongée, tantôt il est comprimé en forme de lance, et quelquefois épanoui à son sommet en forme de capuchon. L'anthère est une bourse portée par le filet, et renfermant le pollen où se trouve la matière fécondante. Chaque granule contient à l'intérieur un liquide de nature un peu visqueuse, paraissant contenir des granules analogues aux animalcules spermatiques. La figure 15 représente le pollen libre, la figure 16 le pollen agglutiné, la figure 17 l'utricule pollinique lançant le fluide fécondant. Dans le pistil, organe femelle de la fleur, se trouvent les ovules fixés sur un *placenta*. Cet organe se termine par le stigmate, espèce de spongiole située à l'extrémité des styles.

Les nectaires sont des glandes excrétoires situées sur l'un des organes floraux, et renfermant un suc appelé *nectar*, que, pour se nourrir, recherchent les insectes suceurs. Aussitôt que la fécondation est achevée, les organes sexuels et toutes les parties de la fleur se flétrissent peu à peu. Les ovules fécondés se développent, sont transformés en graines et les pistils en fruits, renfermant eux-mêmes des

graines; c'est à cette enveloppe qui contient les graines que l'on a donné le nom de péricarpe. Pour bien connaître le péricarpe, il faut avoir une idée des diverses enveloppes dont il est composé.

Les carpelles sont réellement les organes femelles des plantes. Ce sont elles qui, placées au centre de la fleur, tantôt libres, tantôt soudées, constituent le pistil pendant la floraison, et le fruit quand celle-ci est achevée. La carpelle est, comme la feuille, composée de trois parties, une surface externe, une surface interne et un plexus de fibres, de vaisseaux et de tissus cellulaires; cet organe, appelé dans la feuille *mésophylle*, est nommé *mésocarpe* dans les carpelles, et *sarcocarpe* ou chair du fruit quand il est fort épais et très-charnu.

Les fruits sont entiers, divisés, partagés ou multiples suivant que les carpelles sont soudées dans toute leur longueur, ou seulement dans la moitié de cette longueur, ou suivant que les carpelles sont soudées par la base ou qu'elles sont libres de toute cohérence. La figure 18 (pl. III) représente le fruit ou l'embryon pourvu de toutes ses enveloppes, et la figure 19 les diverses parties dont il se compose : *a* est l'épicarpe, *b* le mésocarpe, *c* l'endocarpe. Pour avoir une idée complète des fruits, il faut encore connaître les parties de la fleur qui entrent dans la composition du fruit. Ces parties sont le torus, le calice ou périgone : le premier a été déjà défini. Le calice, qui a été aussi décrit, se prolonge autour du fruit ou sous forme d'écailles distinctes, de filets filiformes, ou sous la forme d'un godet membraneux entourant les carpelles, sans adhérer ou en adhérant avec eux. Le torus et le calice réunis se collent sur les carpelles, et forment alors un ovaire ou calice adhérent. Il existe encore des organes qui semblent faire partie des fruits, quoique situés hors des fleurs; ce sont les bractées, les pédicules et les réceptacles des fleurs. A l'extrémité du cordon ombilical se trouve la graine; les points de contact forment l'ombilic, le hile ou cicatricule. Dans certains points, le cordon s'épanouit avant d'atteindre la graine. La partie épanouie se nomme *arile*.

Nous arrivons à la structure de la graine, qu'il est important de connaître quand on veut étudier l'influence des forces physiques sur la germination.

La graine (fig. 20, pl. III), après la fécondation, est tout simplement une cavité fermée de toutes parts et renfermant le germe de la plante, ou, pour mieux dire, le rudiment de cette plante, qui est un embryon pourvu de diverses parties, dont les unes servent à nourrir la jeune plante dans les premiers temps de la germination, et les autres de

téguments protecteurs. Ces téguments sont quelquefois nommés *spermodermes*, *testa* ou *peau de la graine*, et renferment de l'albumen ou périsperme et l'embryon ; de sorte que la graine proprement dite se compose de trois parties principales indispensables à connaître dans la physique appliquée, savoir : le spermoderme, l'albumen et l'embryon.

Le spermoderme est souvent composé de deux couches ou membranes distinctes dont l'extérieur, ordinairement plus résistant, a reçu spécialement le nom de *testa*, et l'intérieur, plus mince, le nom d'*endoplèvre* ou de *membrane interne*.

C'est dans l'épaisseur du testa que se rangent les vaisseaux qui, partant du funicule, vont porter à l'embryon sa nourriture. L'amande, ou le noyau de la graine, est la partie qui est renfermée dans le spermoderme; dès lors, l'amande comprend l'embryon, ses annexes et l'albumen, qui est un corps commun à plusieurs graines.

L'albumen, ainsi dénommé à cause de l'analogie de ses fonctions avec celles de l'albumine ou blanc de l'œuf, est destiné à nourrir la plante à l'époque de la germination ; tantôt il est huileux, tantôt farineux, tantôt il se présente à l'état corné, et se transforme, lors de la germination, au moyen de l'eau et de la chaleur, en une matière émulsive qui est absorbée par l'embryon et sert à son développement.

L'embryon, comme nous l'avons déjà dit, est une jeune plante en miniature, munie de tous les organes indispensables à la nutrition, tels que racines, tiges et feuilles. La racine est appelée *radicule*, la tige *tigelle*, et les feuilles *cotylédons*. Dans les applications des forces physiques à la végétation, nous verrons de quelle manière les diverses parties de l'embryon se développent.

La radicule, dans la plupart des cas, a une forme conique ayant la plus grande ressemblance avec les racines ordinaires; elle va en s'amincissant depuis le collet jusqu'à l'extrémité qui se termine en pointe. Les racines sont souvent munies de poils d'un blanc d'argent, assez longs, hérissés, et d'une consistance très-molle.

La tigelle est dirigée dans un sens opposé à la radicule. Lors de la germination, elle se dirige vers le zénith, et verdit par l'action de la lumière. La tigelle va du collet aux cotylédons; la continuation de la tigelle au-dessus des cotylédons et les feuilles rudimentaires qu'elle porte constituent la gemmule ou plumule.

Les cotylédons, comme on l'a déjà vu, sont les premières feuilles de la plantule; les graines peuvent avoir un, deux ou plusieurs cotylédons. Dans le premier cas, les végétaux sont appelés *monocotylé-*

dones; dans le second, *dicotylédones*, et dans le troisième, *polycotylédones*. Enfin, on appelle végétaux *acotylédones*, ceux dans lesquels il n'existe pas de cotylédons.

Les cotylédons sont ou charnus ou foliacés; ils sont charnus et ne se colorent pas en vert, quand ils n'ont point de stomates; ils sont foliacés, quand ils sont munis de stomates.

Il ne reste plus à décrire que les organes de la reproduction dans les végétaux cryptogames. Il n'est pas possible, comme l'observe M. de Candolle, d'admettre qu'il existe des plantes dépourvues d'organes sexuels; c'est pour ce motif qu'il a appelé *cryptogames* les végétaux dont la fructification est obscure et même douteuse. Il y a des cryptogames, comme plusieurs mousses, qui paraissent posséder deux modes de reproduction, des graines et des bulbites; c'est ce qui a contribué à répandre du doute sur la structure des cryptogames.

Les figures suivantes représentent les diverses parties d'une graine et de l'embryon à différents degrés de leur développement.

Fig. 21, pl. III, *a*, hile.
b, omphalode.
c, micropyle.
Fig. 22, *a*, omphalode.
b, hile.
c, micropyle.
Fig. 23, embryon.
Fig. 24, embryon simplement péricarpé.
Fig. 25, premier mode de germination, les cotylédons *b'* restent sous terre; *c* radicules; *b''* tigelle; *b'''* feuilles rudimentaires.
Fig. 26, deuxième mode, les feuilles cotylédonaires sont conservées.

Passons actuellement aux organes élémentaires des végétaux, pour ne rien omettre de ce qui concerne leur constitution. Nous avons vu que les plantes, comme tous les corps organisés, sont composées de tissus et de matières reçues ou sécrétées par ces tissus qui constituent les corps eux-mêmes. On ne peut étudier ces organes élémentaires qu'à l'aide du microscope.

Les opinions des physiologistes varient sur l'organisation végétale; et cela tient en grande partie à ce que différentes personnes, regardant au même microscope le même fragment, n'y voient pas toujours les mêmes choses. Lorsque l'on coupe transversalement une plante ou une partie de plante, on y aperçoit, à l'aide d'une forte lentille ou du microscope, des cavités inégales de forme variable,

mais le plus souvent de forme hexagonale. Si la plante est coupée dans le sens de sa longueur, on y remarque des cavités terminées par des diaphragmes, ou bien des cavités tubuleuses dépourvues de cloisons transversales, ou des filets épars plus ou moins opaques. On appelle *cellules* ou *utricules* les cavités fermées de toutes parts ; *vaisseaux,* les tubes ; et *fibres,* les filets. Voyons quelle est la divergence des opinions sur l'organisation des végétaux ; les uns, et c'est la plus ancienne opinion, ont avancé que le tissu végétal est formé de fibres très-minces et diversement entre-croisées ; d'autres, que le tissu végétal est une membrane continue de toutes parts, et dont les dédoublements variés produisent les cavités closes, les vides clos ou tubuleux ; enfin, il y en a qui considèrent le végétal comme composé de cellules ou d'utricules. Nous allons passer successivement en revue le tissu cellulaire, les vaisseaux, les fibres ou couches, les stomates ou pores de la cuticule, les spongioles et suçoirs, les lenticelles, les poils, les réservoirs du suc propre, les cavités aériennes, etc.

Le tissu cellulaire est membraneux, formé d'un grand nombre de cellules, comme un rayon de miel ; on lui donne aussi le nom de *tissu utriculaire* et de *parenchyme*, quand on le considère en masse. Les cavités du tissu cellulaire sont appelées *cellules*, *utricules* ou *vésicules*, suivant les auteurs. Ce tissu existe dans toutes les plantes ; quelques-unes d'entre elles même en sont entièrement composées, comme les champignons, les algues, etc. En général, il entoure les vaisseaux ; il est plus abondant dans les herbes que dans les arbres, et dans les jeunes plantes que dans les vieilles. Le diamètre des cellules varie, sous un grossissement de cent trente fois, de dix millimètres à un millimètre.

Les cellules sont tantôt arrondies, tantôt allongées en fuseau ou amincies aux deux extrémités, ou en tubille, ou en prisme, tantôt allongées en travers.

Les cellules sont, ou remplies d'un suc aqueux, ou pleines d'air ; on y trouve fréquemment de petits grains libres, opaques, sans couleur, appelés *fécule;* d'autres petits globules se rencontrent surtout dans les cellules des parenchymes foliacés, qui se colorent en vert à la lumière, et peuvent prendre diverses autres couleurs ; ces globules, de nature résineuse, forment la matière verte des feuilles, appelée *chlorophylle*. Les cellules allongées du bois de l'aubier et des couches de l'écorce sont des parois épaissies par le dépôt de la matière ligneuse. Les cellules étant closes de toutes parts, ne peuvent recevoir les sucs que par des effets d'eudosmose ou autres. Il existe, en outre, entre

les cellules des espèces de vides, qu'on appelle *méats* ou canaux intercellulaires, lesquels sont remplis de sucs. Passons aux vaisseaux. Les anatomistes ne sont pas généralement d'accord sur leur structure.

Les vaisseaux sont des tubes cylindriques creux, dans lesquels on n'aperçoit aucun diaphragme dans le sens transversal servant à les clore. Ils diffèrent encore des cellules allongées en ce que les parois de celles-ci ne sont pas munies de points, de raies, d'anneaux, de fentes ou de spires. Les vaisseaux spiraux et élastiques sont des trachées, mais qui manquent dans toutes les plantes cellulaires, comme les champignons, les lichens, les algues, etc., nous en offrent des exemples.

Les vaisseaux annulaires ou rayés, qui sont les fausses trachées de M. Mirbel, se montrent dans le ligneux des végétaux vasculaires. Ce sont des tubes cylindriques simples, marqués de raies régulières, transversales et parallèles entre elles. Les vaisseaux ponctués vus au microscope se présentent sous la forme d'un tube cylindrique, dont les parois sont recouvertes de séries transversales de points opaques; ils sont très-abondants dans les dicotylédones. Les vaisseaux en chapelet diffèrent des précédents en ce qu'ils sont étranglés d'une manière plus ou moins sensible de place en place; M. Mirbel les considère comme des cellules placées bout à bout. Les vaisseaux réticulaires sont plus rares que les précédents; leur nom indiquant suffisamment leur organisation, nous nous dispenserons d'en rien dire de plus. Passons aux fibres et aux couches.

Les fibres sont ces filets longitudinaux qu'on obtient en fendant, dans le sens de la longueur, une tige de plante vasculaire; vues au microscope, elles paraissent composées de faisceaux de vaisseaux, entremêlés et entourés de tissu cellulaire allongé. Les couches sont des fibres distribuées circulairement autour d'un axe, soit réel, soit idéal, et forment en général des anneaux concentriques ou des cônes emboîtés les uns dans les autres.

La membrane mince transparente qui recouvre les plantes est l'épiderme ou la cuticule. Cet épiderme est formé d'une ou plusieurs couches particulières de tissu cellulaire, très-distinctes des suivantes, et constituant une espèce d'enveloppe.

Dans les feuilles, la cuticule est facile à enlever; elle se présente alors comme une membrane assez fine, marquée d'aréoles de formes variées. La cuticule est ordinairement transparente et blanchâtre; car la couleur des fleurs et des feuilles dépend de la nature des matières contenues dans le parenchyme; néanmoins, elle influe un peu sur la

coloration, suivant qu'elle est plus ou moins transparente, ou bien qu'elle renferme des teintes jaunâtres. Au microscope ou à l'aide d'une forte loupe, on y distingue des raies en réseau ayant la forme d'aréoles produites par les parois des cellules qui constituent cette membrane.

L'épiderme des vieilles tiges n'offre plus la même structure ; il est formé par l'exfoliation des couches superficielles de l'enveloppe cellulaire corticale. En raison de sa consistance, l'épiderme sert à abriter l'enveloppe cellulaire et à la préserver de l'intempérie des saisons.

La cuticule de la partie herbacée des plantes, vue au microscope, se montre couverte d'orifices ovales appelés *stomates* ou glandes corticales, pores évaporatoires, pores de l'épiderme, pores corticaux ; mais on s'en tient aujourd'hui à la dénomination de stomates. La forme de ces pores est tantôt ovale, tantôt presque arrondie ; leur grandeur varie d'une plante à l'autre, et est ordinairement en rapport avec la grandeur des mailles de la cuticule. Les stomates se voient avec plus ou moins de facilité sur les cuticules des végétaux vasculaires, et en général sur les surfaces foliacées de ces végétaux.

Les deux faces de la feuille ne sont pas pourvues indifféremment de stomates ; les feuilles du poirier n'en ont qu'à la surface inférieure ; celles des liliacées ou des graminées en ont sur les deux surfaces : les feuilles flottantes n'en ont qu'à la surface supérieure. Les stomates se montrent encore sur les pétioles quand ils sont dilatés ; sur les jeunes pousses, quand elles sont herbacées ; on les rencontre aussi sur les calices, les involucres, quand ils sont foliacés : il en est de même des péricarpes quand leur consistance est foliacée.

Les stomates manquent dans plusieurs plantes vasculaires, et cela d'après la manière de vivre de ces dernières, et particulièrement sur les feuilles ou plantes qui vivent dans l'eau. Quoique les fonctions des stomates soient encore un sujet de controverse entre les physiologistes, néanmoins, on ne peut s'empêcher d'admettre que les stomates ne servent à l'exhalaison ou à l'absorption de l'air et de l'eau. Outre les stomates ou pores visibles, il en existe d'invisibles à la surface des végétaux, et dont on ne connaît pas bien les fonctions.

On trouve à la surface extérieure du tissu certaines parties appelées *pores spongieux* ou *spongioles*, destinées à absorber les liquides avec lesquels elles sont en contact. Ces spongioles sont formées d'un tissu cellulaire très-lâche, dont les cellules sont arrondies ; l'extrémité des racines en est pourvue, et c'est par elles que s'opère l'absorption des sucs nourriciers au moyen des phénomènes d'endosmose. Ces spon-

gioles sont appelées *spongioles radicales*. On a aussi quelquefois considéré comme des spongioles pistillaires les parties de l'organe femelle qui absorbent la liqueur fécondante. On les trouve à l'extrémité de cet organe, et elles constituent la partie principale du stigmate.

Quelques physiologistes rangent parmi les spongioles les extrémités des houpes qui existent dans plusieurs lichens, ainsi que l'extrémité absorbante de certains suçoirs; ces derniers servent aux plantes parasites pour enlever aux végétaux voisins la nourriture qui leur est destinée.

L'écorce des branches des arbres présente des taches auxquelles on a donné le nom de *glandes lenticulaires*. Sous leur cuticule se trouve un amas pulvérulent, tantôt verdâtre, tantôt blanchâtre, qui paraît composé par les cellules de l'enveloppe cellulaire désunie et sous forme de vésicule ovoïde. On trouve les lenticules dans presque tous les dicotylédones, excepté dans les conifères, les rosiers; on ne les trouve ni dans les herbes dicotylédones, ni dans les monocotylédones, ni dans les acotylédones. Leur nombre, leur grandeur varient d'un arbre à l'autre, et souvent dans les espèces du même genre.

Il existe dans les végétaux, comme dans les animaux, des organes particuliers, organes sécrétoires qui élaborent un suc spécial aux dépens du fluide nourricier commun; c'est ce qu'on nomme des *glandes*. Les unes sont placées à la surface de divers organes des végétaux, les autres dans l'intérieur de leurs tissus.

La superficie des végétaux est recouverte de petits filaments mous, et ayant beaucoup de ressemblance avec les poils des animaux. Ces poils sont les prolongements d'une ou plusieurs cellules. On en distingue plusieurs classes qui ne se ressemblent que par leur forme générale, mais qui présentent des différences en raison de leur usage, de leur origine et de leur structure. Ainsi, l'on reconnaît des poils glanduleux, lymphatiques ou non, corollins, écailleux, ciliaires, poils radicaux.

Outre les glandes qui sécrètent des sucs particuliers, il existe des vaisseaux propres ou réservoirs qui renferment des liquides colorés, d'une nature particulière, mais seulement dans certains végétaux.

Le tissu cellulaire, en se distendant, donne naissance à des cavités qui se remplissent de suc propre; il arrive quelquefois que, par l'acte de la végétation, ce tissu, en se distendant, finit par se rompre, et forme des cavités qui se remplissent d'air, et auxquelles on a

donné le nom de *moelle*, de *vaisseaux pneumatiques*, de *réservoirs d'air accidentels*, enfin de *cavités aériennes*.

On distingue enfin dans la structure des végétaux les raphides, faisceaux de cristaux que l'on trouve dans les cavités internes.

Telles sont les données générales que le physicien doit posséder sur la structure des végétaux, s'il veut se livrer à des recherches touchant l'action des forces physiques sur les phénomènes de la vie dans les plantes.

De la fécule et de sa constitution.

Il existe plus ou moins abondamment, dans diverses parties des végétaux, une matière ayant une organisation particulière, qu'on appelle *fécule*, et dont le physicien et le naturaliste ont besoin de connaître la constitution et les propriétés physiques. Cette matière se trouve dans les graines des céréales, des légumineuses, etc., dans les tubercules, comme la pomme de terre, le topinambour, etc., dans un grand nombre de bulbes, etc.

Leuwenhœck annonça le premier, en 1716, que les grains de fécule vus au microscope avaient une forme globuleuse; mais il ne poussa pas plus loin son examen. Dès lors, on commença à considérer les grains de l'amidon comme des vésicules remplies d'une substance homogène, ayant de l'analogie avec la gomme arabique. M. Raspail, qui a étudié cette matière avec soin, avait annoncé que chaque grain était composé d'un tégument lisse, inattaquable par l'eau et les acides à la température ordinaire, et d'une substance soluble ayant de l'analogie avec la gomme et à laquelle on donna le nom *d'amidine*, en réservant la dénomination d'*amidin* pour le tégument; mais ce qu'il y a de caractéristique dans ses observations, c'est l'existence d'un point marqué sur les grains de plusieurs fécules qu'il nomma *hile*. M. Turpin, qui soumit également les grains de la fécule de pomme de terre à des observations microscopiques, observa en outre sur ces grains des zones d'accroissement et des grains greffés deux à deux; M. Biot, de son côté, en a remarqué jusqu'à trois. Des analyses chimiques firent connaître qu'un grand nombre de fécules possédaient même composition, même poids atomique et des qualités physiques identiques. Au moyen de la lumière polarisée, M. Biot remarqua une constitution particulière et des couches d'inégale densité autour d'un axe. M. Dutrochet constata par l'endosmose que les globules ne contenaient aucune matière soluble directement à froid. M. Payen, ayant rompu un grand nombre de ces grains, prouva qu'en

effet toute la masse intérieure de l'amidon était solide et insoluble dans l'eau ; à l'aide de plusieurs réactions, il parvint à exfolier les diverses enveloppes du grain de fécule, et expliqua les inégales densités au moyen des différentes proportions d'eau dans les couches inégalement denses. Tous ces résultats mirent M. Payen à même d'en conclure que l'amidon était composé d'une seule substance, dont les couches superposées avaient plusieurs degrés d'agrégation, et qu'il était, par conséquent, partout homogène dans sa composition. Les dimensions des grains de différentes fécules ont été déterminées au microscope, en 1825, par MM. Raspail et Dumas. M. Payen, de son côté, a fait également des déterminations semblables. On trouvera dans le tableau suivant les principaux résultats obtenus :

Tableau des dimensions maxima en longueur des grains de différentes fécules, mesurées en millièmes de millimètre.

1	Tubercules de grosses pommes de terre de Rohan	185
2	Racine de colombo (*menispermum palmatum*)	180
3	Rhizômes le plus volumineux du *canna gigantea*	175
4	*id.* du *canna discolor*	150
5	*id.* de *maranta arundinacea* (arrow.-rout. du commerce)	140
6	Plusieurs variétés de pommes de terre	140
7	Bulbes de lis	115
8	Tubercules d'*oxalis crenata*	100
9	Tige d'un très-gros *echinocactus erinaceus* importé	75
10	Sagou importé	70
11	Graine de grosses fèves	75
12	*id.* de lentilles	67
13	*id.* de haricots	63
14	*id.* de gros pois	50
15	Fruit du blé blanc	50
16	Sagou non altéré (fécule de la moelle fraîche du sagouier)	45
17	Grandes écailles de bulbes de jacinthe	45
18	Base des pétioles d'un *cycas circinalis*	45
19	Tubercules de batates	45
20	*id.* d'*orchis latifolia et bifolia*	45
21	Fruit du gros maïs (blanc, jaune et violet)	30
22	Fruit du sorgho rouge	30
23	Tiges volumineuses du *cactus peruvianus*	30
24	Graine de *naïas major*	30
25	Tige de *cactus pereskia grandiflora*	22,5

26	Graine d'*aponogetum distachyum*	22,5
27	Tige du *ginkgo biloba* (*salisburia adiantifolia*)	22
28	Tige de *cactus brasiliensis*	20
29	Fruit du *panicum italicum*	16
30	Graines de *naïas major* à demi développées	16
31	Pollen du *globba nutans*	15
32	Tige du *cactus flagelliformis*	15
33	Tige d'*echinocactus erinaceus* de serre	12
34	Pollen du *ruppia maritima*	11
35	Tige d'*opuntia tuna* et *ficus indica*	10
36	*id*......*id*.......*curassavica*	10
37	Fruit du gros millet (*panicum miliaceum*)	10
38	Tige de *cactus mamillaria discolor*	8
39	Écorce d'*aylanthus glandulosa*	8
40	Tige de *cactus serpentinus*	7,5
41	Racine de panais	7,5
42	Pollen de *naïas major*	7,5
43	Tige de *cactus monstruosus*	6
44	Graine de betterave	4
45	Graine du *chenopodium quinoa*	2

Pour étudier la constitution des grains de fécule et leur mode de rupture, il faut, suivant M. Payen, les rompre sans altérer la substance; le meilleur moyen est de les écraser par une pression graduée. A cet effet, on comprime, entre deux lames de verre, la fécule de la pomme de terre dite de Rohan, en raison de la grosseur de ces grains; puis on la soumet à l'examen microscopique. On reconnait alors des grains plus ou moins profondément fendus, étoilés, et d'autres séparés en divers fragments; les fig. 27, 28, 29, 30, 31, 32 (pl. III), représentent les différentes formes qu'affecte la fécule.

A et A' (fig. 27 et 28) représentent les grains de fécule extraits d'une pomme de terre de Rohan, parvenue à sa maturité complète. Ces grains sont composés de portions de sphéroïdes et d'ellipsoïdes; la marque du hile se trouve sur leur surface ainsi que celle des lignes des degrés d'accroissement des déchirures spontanées.

Tronçon d'un grain (fig. 29).

Grain sphéroïde cassé (fig. 30).

Grain ellipsoïde rompu en trois, suivant des sections partant du centre (fig. 31).

Fig. 32, 23, 34. *Fécules à l'état normal de colombo.* On y remarque des protubérances mamelonnées, qui semblent sortir de

ces grains et se prolongent quelquefois en arêtes fusiformes. On y remarque la place du hile.

Les fécules des différentes plantes nous présentent des particularités dont nous ne pouvons parler, en raison des détails dans lesquels nous serions obligés d'entrer, et qui, du reste, ne sont pas de notre compétence.

CHAPITRE V.

De l'organisation et de la structure des animaux.

Dans les animaux et les végétaux, les phénomènes de la vie présentent des points nombreux de ressemblance, mais aussi de grandes dissemblances, en raison même du mode d'organisation des individus composant ces deux grandes classes de corps. Pour mieux établir la ligne de démarcation qui les sépare, nous allons suivre, à l'égard de l'organisation et de la structure des animaux, le même plan que nous avons adopté pour les végétaux.

Il existe des différences telles entre certains animaux, sous le rapport de leur organisation, qu'il est impossible de décrire ceux-ci d'une manière générale, en prenant toutefois l'homme pour type, sans parler de ces différences, de même que nous avons rappelé que les végétaux étaient partagés en monocotylédones, dicotylédones et acotylédones.

Des grandes divisions du règne animal.

Cuvier a partagé le règne animal en quatre grandes divisions ou embranchements :

Les vertébrés,
Les mollusques,
Les articulés,
Les zoophytes ou rayonnés.

Chacun de ces embranchements est composé de corps formés sur un même plan et tellement distinct, que l'on ne peut passer d'un plan à un autre sans changement notable. En effet, on peut, par des modifications plus ou moins graduées, en partant de l'organisation de

l'homme, arriver à celle des mammifères, de l'organisation des mammifères à celle des oiseaux, des reptiles, des poissons ; mais il n'y a plus de transition possible des poissons aux mollusques, et les différences sont considérables entre les types des groupes formés par les mollusques, les articulés et les zoophytes. Il existe donc dans les animaux quatre grands types de forme, dont nous allons essayer de tracer les caractères généraux.

Les vertébrés sont pourvus d'une moelle épinière formant un cône médullaire, d'où partent des nerfs qui se ramifient dans toutes les parties du corps, lequel, prenant un plus grand développement à son extrémité antérieure, forme l'encéphale. Ils possèdent seuls un double système nerveux, celui de la moelle épinière, celui du grand lymphatique, et un canal composé de vertèbres osseuses ou cartilagineuses ; deux mâchoires horizontales, un cœur musculaire, le sang rouge, un système de vaisseaux chylifères et absorbants, un foie, une rate, un pancréas, des reins, et enfin des organes pour la vue, l'ouïe, l'odorat, le goût et le toucher.

Les mollusques possèdent une masse céphalique généralement considérée comme un cerveau très-réduit ; mais ils n'ont ni moelle épinière, ni grand lymphatique ; ils n'ont qu'un système nerveux ganglionnaire. En outre, ils n'ont ni vrai squelette, ni vaisseaux absorbants, ni rate, ni pancréas, ni veine-porte, ni reins, ni les organes de l'odorat et de l'ouïe ; à l'exception d'une seule famille, les autres sont privés de la vue ; mais toutes les familles ont un système complet et double de circulation, des organes respiratoires, un cœur, un foie, etc. Les mollusques prennent rang après les vertébrés, en raison de la richesse de leurs organes.

Les articulés diffèrent à leur tour des mollusques par des caractères importants ; ils ont, à la vérité, un petit cerveau placé sur l'œsophage ; mais la partie la plus considérable de leur système nerveux se compose de deux cordons qui règnent le long du ventre, et s'y unissent d'espace en espace, de manière à former des ganglions d'où partent des nerfs. Cette portion du système nerveux, que quelques anatomistes ont considérée comme une sorte de moelle épinière, au lieu d'être placée au-dessus du canal digestif, comme dans les vertébrés, est placée, au contraire, au-dessous. Il y a également inversion dans la position du cœur. Les articulés s'écartent des mollusques en ce qu'ils ont un squelette ; mais ce squelette, au lieu d'être à l'intérieur et recouvert de muscles comme dans les vertébrés, est, au contraire, extérieur et recouvre les muscles.

Les zoophytes offrent des caractères non moins circonscrits, non moins déterminés que les précédents. Leur structure est plus simple, et toutes les parties qui les composent sont disposées autour d'un centre comme les rayons d'un cercle, ce qui leur a fait donner la dénomination d'animaux rayonnés.

En établissant ainsi les quatre grandes divisions du règne animal, Cuvier a montré en même temps que chacune de ces formes types dépend de la forme du système nerveux qui est en quelque sorte tout l'animal lui-même. Dans les animaux vertébrés, le système nerveux forme un cône médullaire central, de chaque côté duquel s'épanouissent en ordre symétrique tous les nerfs; aussi voit-on tous les vertébrés pourvus d'un tronc autour duquel viennent se ranger symétriquement toutes les parties de l'organisme.

Dans les mollusques, le système nerveux n'a qu'une disposition confuse; aussi leur corps n'est-il qu'une masse dont les parties n'offrent point de symétrie.

Les corps des articulés ont plus de symétrie que les précédents; aussi leur système nerveux en a-t-il davantage. Ce système, en effet, est articulé à l'intérieur et leur corps l'est à l'extérieur.

Dans les zoophytes ou animaux rayonnés, les derniers *vestiges* du système nerveux affectent, chez quelques-uns, la forme étoilée que prend le corps entier.

De la dépendance qui existe entre la forme du système nerveux et celle du corps, il résulte que c'est le système nerveux qui sert à comparer entre eux les divers types; il doit donc servir de base aux quatre grandes divisions ou embranchements. Pour établir les subdivisions ou les classes, on s'appuie sur les modifications des organes de la circulation et de la respiration qui, après le système nerveux, sont les plus importants.

Traçons d'une manière générale les différences qui existent entre les organes de la circulation et de la respiration des animaux des quatre grandes divisions.

Les vertébrés ont une respiration complète, simple, et une double circulation, comme dans les mammifères; une respiration et une circulation doubles, comme dans les oiseaux; une respiration simple et complète, puisqu'elle est toujours aérienne; combinée avec une circulation simple comme dans les reptiles; une circulation double combinée avec une respiration incomplète, comme les poissons en sont un exemple. C'est en raison de cette distinction entre les organes de la respiration et de la circulation dans les vertébrés qu'on a divisé ceux-ci

en quatre classes : les mammifères, les oiseaux, les reptiles et les poissons.

Dans les mollusques, les uns ont trois cœurs, d'autres deux, d'autres enfin un seul. De ces cœurs, il y en a qui n'ont qu'un seul ventricule et une oreillette, d'autres un seul ventricule et deux oreillettes, d'autres un seul ventricule sans oreillette. Il existe, en outre, des mollusques qui respirent par des cavités pulmonaires, d'autres par des branchies, et d'après les différences que l'on a remarquées dans leur organisation, on a divisé les mollusques en cinq classes : les céphalopodes, les gastéropodes, les acéphales, les ptéropodes, les brachiopodes. Les cirrhopodes formaient la sixième classe ; mais on les a placés dans les animaux articulés.

Les articulés, en ayant égard aux variations des mêmes organes, ont été divisés en quatre classes : 1° les annélides, dont le sang est rouge ; 2° les crustacés, dont le sang est blanc, qui ont un système vasculaire, et qui respirent par des branchies ; 3° les arachnides, qui n'ont pour cœur qu'un simple vaisseau dorsal, d'où partent des branches artérielles et où arrivent des branches veineuses, et qui respirent par des poumons ou des trachées ; 4° les insectes, qui n'ont ni artères, ni veines, qui n'ont qu'un vestige de cœur, et dans lesquels la respiration s'opère par des trachées ou vaisseaux élastiques répandus dans tout le corps.

Dans les articulés, on voit distinctement le passage des animaux qui ont une circulation d'avec ceux qui n'en ont point. Le quatrième embranchement, ou les zoophytes, offre cette particularité de la disparition, de la fusion graduée et successive de tous les organes dans la masse générale. Dans les uns, on voit encore des vaisseaux clos, des organes de respiration distincts ; dans les autres ces parties manquent, mais ils ont encore des intestins visibles ; enfin, les derniers ne présentent plus qu'une masse pulpeuse homogène. C'est en raison de ces diverses modifications et de la disparition graduée que les zoophytes ont été divisés en cinq classes, savoir : les échynodermes, les vers intestinaux, les acalèphes, les polypes, les infusoires. Il ne nous appartient pas d'entrer dans une discussion suivie et raisonnée sur l'unité de composition et l'unité de plan, attendu que nous nous éloignerions du but de cet ouvrage. Mais si le système nerveux et les organes de la circulation et de la respiration ont servi à former les embranchements et les classes, on a obtenu successivement les ordres, les familles, les tribus, les genres, les sous-genres, en prenant en considération des organes de plus en plus subordonnés. Il serait

trop long d'entrer dans l'énumération de toutes les subdivisions pour chacune des classes des quatre embranchements. De même que l'on passe des classes aux ordres, au moyen des modifications principales des organes combinés du toucher et de la manducation, de même aussi passe-t-on des ordres aux familles, en ayant égard aux modifications secondaires de ces mêmes organes ; ainsi de suite pour les tribus, les genres et les sous-genres. Mais toute cette classification n'a qu'un intérêt secondaire pour le physicien qui n'a besoin que de connaître d'une manière générale la disposition et le rapport des principaux organes qui doivent être le sujet de ses études.

Un animal vivant est composé d'un certain nombre d'appareils, ou organes destinés à remplir des fonctions qui concourent au même but, le maintien de la vie. Voici ces principaux organes : appareil digestif, appareil respiratoire, appareil circulatoire, appareil de sécrétion (glandes, membranes séreuses), appareil nerveux, appareil locomoteur (os, muscles), appareil génital. Chacun de ces appareils se subdivise en un certain nombre d'organes ; c'est ainsi que l'appareil digestif comprend la bouche, le pharynx, l'œsophage, l'estomac, etc. L'appareil respiratoire comprend les poumons, la trachée, les bronches, les plèvres, etc. Il en est de même pour les autres organes, dont chacun n'est point un corps simple, car il est constitué, soit par des filaments, des membranes ou des fibres.

Il nous est impossible d'entrer dans les détails anatomiques de tous ces organes ; nous devons seulement nous borner à faire connaître succinctement les parties qui sont accessibles aux recherches du physicien, et dont il a besoin pour étudier l'accroissement des os, la température intérieure de l'homme et des animaux, l'excitabilité des muscles, l'irritabilité des nerfs, les phénomènes de la respiration, de la vue, de l'ouïe et de la voix. Il doit donc avoir une idée générale de la structure des os, des muscles, des nerfs, du cœur, de l'œil, de l'oreille et du larynx, et connaître également la composition physique du sang et de quelques sécrétions qui renferment des globules considérés comme molécules organiques. Aller au delà serait dépasser le but que nous nous proposons dans cet ouvrage.

Des os.

Les os sont considérés comme des cartilages durcis par le dépôt de sels calcaires formés dans leur épaisseur ; car il suffit de les mettre en digestion dans de l'acide hydrochlorique pour enlever le calcaire et mettre à nu les cartilages. On y distingue trois parties différentes sous

le rapport de leur structure : 1° une membrane appelée *périoste* qui enveloppe l'os de toutes parts ; 2° des canaux et des cellules entourés de lamelles concentriques, et qui renferment de la moelle ou une substance analogue : ils sont pourvus de vaisseaux nombreux ; 3° des corpuscules particuliers dispersés dans les lamelles qui entourent les canaux et les cellules. Les os varient de forme ; ils sont longs, courts ou plats, suivant leur position dans l'animal. Les premiers ont une cavité médullaire et leur forme est à peu près cylindrique : les tubes qui composent leur tissu sont disposés longitudinalement ; les seconds sont également formés de tubes, mais parallèles à la surface de l'os ; les troisiemes ont des cellules au lieu de tubes. Ces notions tres-succinctes suffisent au physicien pour se livrer à des recherches expérimentales sur l'accroissement des os.

Des muscles.

Pour étudier la structure des muscles et des nerfs, on est arrêté par cette considération, que tous les anatomistes qui ont traité la question ne sont pas d'accord entre eux. Dès lors, le physicien qui n'a pas les connaissances nécessaires pour discuter toutes les opinions, se trouve dans le plus grand embarras. Dans ce cas, il doit s'en tenir aux faits généralement adoptés. Nous sommes donc dans l'obligation d'exposer les opinions des divers anatomistes.

Borelli a considéré les muscles comme des faisceaux sur lesquels on voit des fibres transversales. En général, tous les anatomistes ont vu ces lignes transversales qui sont très-serrées les unes contre les autres ; mais ils ont différé d'opinion sur la manière dont on devait décrire ces stries, ainsi que leur forme élémentaire. Suivant Leuwenhoek, les muscles sont composés de fibres sur lesquelles on remarque des stries circulaires, et dont la largeur est le quart d'un cheveu ; il en faut, dit-il, deux cents pour former un muscle. Chacune de ces fibres est elle-même composée de cent à deux cents fibres élémentaires, et entourée d'une membrane. Tréviranus a avancé que les muscles sont composés de cylindres entourés de stries transversales parallèles, chaque cylindre ayant ses stries qui disparaissent en comprimant les fibres. Bauer et Home considèrent les fibres élémentaires comme composées de globules ayant la grandeur des globules du sang. Suivant d'autres observateurs, tels que Vagnier, le muscle paraît composé, sous le microscope, de faisceaux musculaires séparés, prismatiques, qui font voir, à la surface des lignes transversales, qu'il existe de véritables rides dont l'intervalle est toujours marqué par la

ligne noire; ces rides, toujours parallèles, n'entourent pas quelquefois tout le faisceau, puisqu'elles s'en trouvent déviées. Elles appartiennent à chaque faisceau, ne sont que superficielles, n'appartiennent pas à des cloisons, et disparaissent à une forte pression. Vagnier considère chaque faisceau comme composé de fibres primitives très-minces, presque parallèles et de même grandeur, dans tous les animaux vertébrés, les insectes, etc. Suivant cet anatomiste, il existe une grande uniformité dans la structure des muscles de l'homme, des mammifères, des oiseaux, des poissons, des insectes et des crustacés, conséquence à laquelle ont été conduits également d'autres anatomistes.

MM. Prévost et Dumas divisent la fibre musculaire en trois ordres, savoir : en fibres tertiaires (pl. IV, fig. 1), qui sont les filaments musculaires que l'on obtient en fendant le muscle dans le sens de la longueur; en fibres secondaires (pl. IV, fig. 2), qui proviennent de la division des précédentes, et en fibres primitives, qui proviennent de la division de celles-là (fig. 3). M. Milne-Edwards, qui s'est occupé d'une manière spéciale de la fibre élémentaire, a reconnu qu'elle était identique dans tous les animaux, à tous les âges, et formée d'une série de globules d'un même diamètre; les fibres secondaires seraient donc formées de la réunion d'un faisceau de semblables chapelets. Suivant ces trois observateurs, quand on soumet à un microscope d'un grossissement ordinaire les fibres secondaires, on les voit comme des lignes barrées en travers par un nombre considérable de petites lignes sinueuses, placées à la distance régulière de $\frac{1}{300}$ de millimètre, fig. 3. Cet aspect, qui paraît dû à la gaîne membraneuse dont elles sont revêtues, ne se retrouve pas dans la fibre secondaire qui a été fendue ou déchirée, et varie avec la direction de la lumière; on doit donc le considérer, suivant eux, comme un effet d'optique. Du reste, elle est composée d'un très-grand nombre de petits filets élémentaires placés parallèlement, ou à peu près, à côté les uns des autres. En examinant également au microscope un muscle en repos et suffisamment fin pour qu'on puisse le voir par transparence, on voit qu'il est formé de la réunion d'un certain nombre de fibres sensiblement parallèles, très-flexibles, et disposées de manière à pouvoir changer facilement de position : tout cet échafaudage est maintenu par un tissu cellulaire, et sillonné en différents sens par des vaisseaux et des nerfs qui le parcourent, sans avoir avec lui de liaisons faciles à observer. La fig. 4 représente un muscle en repos avec un nerf *aa* qui s'y distribue.

Nous passerons sous silence les travaux des autres anatomistes,

pour indiquer les recherches microscopiques récentes, pleines d'intérêt, de M. Bowman, qui a étudié avec soin les muscles de divers animaux, et dont nous avons constaté nous-mêmes l'exactitude, dans l'étendue, toutefois, de nos connaissances en anatomie.

1° Les faisceaux primitifs (pl. IV, fig. 4) des muscles élémentaires consistent en masses allongées, polygonales, composées elles-mêmes de particules élémentaires ou éléments charnus, arrangés et unis ensemble aux deux bouts et sur les côtés, de manière à constituer dans ces deux directions respectives des fibrilles et des disques qui peuvent en être séparés; les stries noires longitudinales sont des ombres entre les fibres, et les stries noires transversales sont des ombres entre les disques.

2° Chaque faisceau primitif (fig. 6, 6 bis) est entouré d'une gaîne membraneuse très-délicate, transparente et probablement élastique, comme on peut le voir en examinant au microscope un fragment de muscle de raie, qu'on a tiraillé de manière à rompre les fibrilles. A cet effet, on enlève avec une pince et un scalpel un lambeau de fibre, et avec deux aiguilles on en détache les faisceaux primitifs, que l'on puisse apercevoir au microscope. Un de ces faisceaux est placé sur une lame de verre avec un peu d'eau, et on le recouvre d'une lame de mica. Dans les préparations, il faut mouiller le muscle. La figure 7 est un faisceau primitif en partie rompu, dont l'enveloppe renferme un fragment détaché; la figure 8 représente le fragment d'un cœur de bœuf macéré, dans lequel on aperçoit les fibrilles et leur union pour former des stries.

3° Chaque faisceau primitif contient des corpuscules qui sont les noyaux des cellules primitives de développement. Pendant l'accroissement, ces corpuscules deviennent plus nombreux.

4° Les extrémités des faisceaux primitifs, dans certains cas au moins, sont continues directement avec la structure tendineuse ou fibreuse; elles ne sont pas coniques, mais tronquées obliquement ou transversalement. Cette manière de voir est en opposition avec l'opinion que le tendon entoure chaque faisceau et est continu d'un bout à l'autre, en constituant la gaine cellulaire.

Pour voir les stries transversales, il faut opérer sur la fibre musculaire du bœuf, que l'on divise avec une aiguille; pour obtenir une section transversale, fig. 5, il faut prendre le muscle pectoral d'un oiseau, le faire dessécher, et en couper une tranche que l'on étale sur une lame de verre. Ces observations sont de nature à fixer l'opinion des anatomistes sur la structure des muscles.

Des nerfs.

Nous allons agir à l'égard des nerfs comme pour les muscles, c'est-à-dire, exposer succinctement les opinions des physiologistes sur leur structure, afin de ne prendre que ce qu'il y a de commun, seul point qu'on puisse regarder comme ce qu'il y a de plus certain. Les opinions sont partagées à l'égard du cerveau, origine des nerfs, dont la structure est en général globuleuse ou tubuleuse, ainsi que sur la forme, la grandeur et le rapport des globules.

Haller admettait dans les nerfs une structure tubuleuse. Borelli considérait le nerf comme composé d'un faisceau de plusieurs filets fibreux, ayant une enveloppe commune, considérant ces filets fibreux comme creux et remplis d'une matière molle.

Malpigi pensait que la structure du cerveau était glanduleuse. Leuwenhoek varia dans ses opinions; dans les dernières années de sa vie, il annonça que les nerfs étaient composés de tuyaux parallèles, longitudinaux, creux, et dont le diamètre était trois fois aussi large que leur cavité interne. Les figures 9 et 10, pl. IV, représentent, l'une un nerf disséqué dans sa longueur, l'autre une section transversale. Les autres nerfs qui se trouvent autour sont indiqués, ainsi que le tissu adipeux.

Della Torre a considéré les nerfs comme composés de filaments droits, mais non transparents, d'une délicatesse extrême, sans aucun canal au milieu; mais parmi eux se trouvent un grand nombre de petits globules presque ronds et transparents.

Prochaska admit que ces globules étaient huit fois plus petits que les globules du sang, qu'ils n'étaient pas du tout réguliers, ni en rapport avec les différentes parties du système nerveux.

Fontana a considéré la substance médullaire du cerveau comme composée de cylindres ou canaux transparents irréguliers, se repliant ensemble en manière d'intestins, substance qu'il a nommée *intestinale*. A côté d'elle se voient des corpuscules nageant dans l'eau. Suivant lui, le cylindre nerveux primitif, c'est-à-dire, le nerf dépouillé avec une aiguille de la surface raboteuse qui l'enveloppe, est un cylindre transparent.

Tréviranus a dit que les nerfs des animaux des quatre classes étaient composés de tuyaux parallèles, membraneux, remplis d'une substance tenace, et offrant à l'état frais de petits globules à l'intérieur.

MM. Prévost et Dumas, ainsi que M. Milne Edwards, trouvent, dans

ce que Fontana appelait fibres primitives, quatre autres fibres composées de globules de $\frac{1}{300}$ de millimètre, dont deux au bord du tuyau et deux à l'intérieur. Les quatre fibres internes seraient donc les véritables fibres élémentaires. La fig. 11 represente les fibres secondaires.

M. Raspail ayant fait dessécher spontanément sur une lame de verre de gros nerfs, enleva, à l'aide d'un rasoir, des tranches qui dépassaient à peine $\frac{1}{10}$ de millimètre, et qui, vues au microscope, se présentent sous une forme parfaitement homogène, et sans la moindre solution de continuité. Il y a donc deux opinions bien distinctes. Les uns admettent une structure globuleuse, tandis que d'autres, et c'est l'opinion généralement admise, considerent les nerfs comme formés de tubes plus ou moins irréguliers.

M. Ehrenberg a cherché à prouver que l'état globuleux ne saurait exister. En examinant au microscope la matière blanche du cerveau, de la moelle, des nerfs, de l'ouïe, de la vue et de l'odorat, il a reconnu qu'ils étaient composés de tubes transparents présentant, à des intervalles marqués, des dilatations sphéroïdes et globuleuses, ce qui leur donne la forme d'un chapelet (fig. 12, 13, pl. IV). Ces tubes sont paralleles, et ne perdent cette position que par la manœuvre de l'observateur ; ils présentent une cavité intérieure remplie d'une matière particulière sans aucune trace de globules, et à laquelle Ehrenberg a donné le nom de fluide nerveux ; leur diamètre varie entre $\frac{1}{98}$ et $\frac{1}{3000}$ de ligne. En les déchirant, on ne voit jamais sortir de liqueur. Plus on se rapproche de la périphérie du cerveau, plus les tubes diminuent de diamètre, de manière que dans la matière grisâtre ces tubes ne forment plus qu'une masse granuleuse, formée de grains extrêmement fins, qui sont unis au moyen de fils très-minces. Parmi ces fibres, ainsi qu'à la surface de la rétine, se trouvent des grains plus forts, qui paraissent formés de petites granulations, et servent peut-être à la nourriture des nerfs, qui, par leurs bouts béants, pourraient les absorber.

Telle est, suivant Ehrenberg, la constitution des nerfs du sentiment. Voyons comment il envisage la structure des nerfs du mouvement.

Ces nerfs sont pourvus de tubes droits et uniformes bien différents, sans dilatation, plus gros que les tubes articulés dont ils sont la continuation. Ils contiennent dans leur intérieur une matiere peu transparente, blanche, visqueuse, qu'on peut retirer des tubes sous forme de grumeaux, et qu'il appelle matière médullaire. Leur diamètre varie entre $\frac{1}{48}$ et $\frac{1}{1000}$ de ligne.

Krause n'admet pas tous ces résultats ; il regarde le cerveau

comme formé de fibrilles solides, composées d'une masse soluble dans l'eau, et de globules blancs sphériques de $\frac{1}{800}$ de ligne de diamètre.

Valentin considère le système nerveux comme composé de deux masses primitives; de fibres primitives isolées et de petits corps isolés en forme de massue, qui forment la couche. Ces deux formes se trouvent également dans le système nerveux central et périphérique. Il n'y a pas de transition entre elles. Quand les fibres primitives se trouvent parallèlement les unes aux autres, elles constituent la formation des nerfs. Ces tubes, ainsi que les petits corps isolés, sont entourés de gaines variant d'épaisseur dans les différentes parties du système nerveux, et composés du tissu cellulaire.

Les petits corps varient de forme, qui tantôt est plus ou moins ronde ou allongée. La substance des fibres primitives est partout transparente; les gaînes des nerfs et des globules sont beaucoup plus épaisses dans les parties périphériques que dans le centre; elles deviennent extrêmement minces sitôt que les nerfs entrent dans le cerveau. C'est alors qu'elles deviennent variceuses par la simple pression.

Burdach a fait des observations intéressantes sur l'influence de la température et de différents réactifs chimiques sur les nerfs. Il paraît que les fibres primitives du cerveau et de la moelle épinière éprouvent une altération, même une destruction complète, plus rapidement que les fibres primitives des nerfs périphériques. Dès lors il faut observer au microscope, autant que possible, sans soumettre les nerfs à l'action de la chaleur ou des réactifs.

En résumant tout ce qui a été dit concernant la structure des nerfs, on voit que la structure globuleuse, admise d'abord comme structure élémentaire du système nerveux, a été abandonnée bientôt par les auteurs, tandis que la structure tuberculeuse, repoussée par les anatomistes, qui croyaient voir dans les globules les parties élémentaires des nerfs et des muscles, paraît être admise aujourd'hui par la plupart des anatomistes, qui sont néanmoins encore en désaccord sur leur contenu solide ou liquide.

Nous revenons sur l'opinion de MM. Prévost et Dumas à l'égard de la constitution des nerfs. Si l'on divise, suivant eux, un nerf dans le sens de la longueur, et qu'on étale sous l'eau la matière pulpeuse renfermée sous le névrilème, on voit un assemblage nombreux de petits filaments parallèles, égaux en grosseur, et qui semblent continus dans toute la longueur du nerf. Ces filaments plats paraissent composés de quatre fibres élémentaires disposées à peu près sur le même plan, et formées de globules qu'on n'adopte plus aujourd'hui.

Il nous importe, pour la théorie des contractions, de suivre le nerf à son entrée dans le muscle, puisque celui-ci se contracte par l'excitation du nerf. On voit le nerf se ramifier d'une manière peu régulière en apparence, si ce n'est une tendance marquée dans les rameaux à se diriger perpendiculairement aux fibres musculaires. On peut faire cette observation sur le muscle sterno-pubien de la grenouille (fig. 15, pl. IV). Il suffit d'observer avec des lentilles d'un grossissement de deux ou trois cents diamètres. Dans la figure 32, on voit deux troncs nerveux parallèles aux fibres du muscle, qui cheminent à distance l'une de l'autre, et se transmettent mutuellement de petits filets nerveux. D'autres fois, comme dans la figure 14, le tronc est perpendiculaire aux fibres du muscle; on voit les derniers ramuscules nerveux épanouis et établis dans les troncs AA, puis se répandant au travers des fibres musculaires et perpendiculairement à leur direction, se contournant sur eux-mêmes en forme d'anse pour venir dans le tronc qui les a fournis. Les nerfs n'auraient donc point de terminaison, et se comporteraient comme les vaisseaux sanguins.

M. Breschet, qui a étudié la structure des nerfs, a remarqué que les filets provenant des troncs nerveux, disséminés dans le tissu musculaire sous-cutané, se subdivisent à l'infini en approchant du derme, et on ne pourrait les distinguer si l'on ne voyait le point où ils entrent et celui auquel ils aboutissent. La direction des papilles dans l'épiderme est oblique et légèrement inclinée; outre leur névrilème, elles ont encore une gaine propre qui les couvre en forme de capuchon, laquelle est formée aux dépens de la matière cornée. Le corps des tiges nerveuses s'effile et s'arrondit par un sommet renflé comme une baguette de tambour.

Le corps du nerf, sous le névrilème, est formé de stries légères ondulées, qui, partant de la base, deviennent moins marquées et souvent vaporeuses à mesure qu'elles serpentent vers le renflement terminal, où elles paraissent se réunir en demi-cercle concentrique. La surface en est lisse et unie, et aucune partie ne s'en détache pour communiquer avec les tissus voisins. La figure 16 est la papille, munie de sa gaîne; la fig. 17, la papille sans gaîne. Cette manière de voir a de l'analogie avec celle de MM. Prévost et Dumas; néanmoins elle n'est pas adoptée par plusieurs anatomistes.

Pour étudier les causes qui interviennent dans la production de la chaleur animale chez l'homme et les autres mammifères, il faut avoir une idée des principaux organes où elle a lieu. Commençons

par le cœur. Le cœur est placé entre les poumons, dans une cavité de la poitrine appelée thorax. Il est enveloppé par une espèce de double sac membraneux, le péricarde. Sa forme générale est celle d'un cône renversé. Sa substance est presque entièrement charnue. Il est composé de quatre cavités, deux à droite, deux à gauche; de chaque côté il y a une oreillette et un ventricule. Ce sont, pour ainsi dire, deux cœurs qui jouent ensemble. Les deux ventricules se dilatent et se contractent ensemble. Suivons le sang dans son cours : le ventricule gauche qui renferme le sang artériel lance ce dernier, en se contractant, dans le système artériel. Il pénètre jusqu'aux radicules artérielles les plus ténues, qui constituent avec les radicules veineuses le système capillaire. Le sang passe ensuite des premières dans les secondes. Les deux systèmes capillaires sont-ils continus ou s'abouchent-ils ensemble, ou bien le sang, pour passer de l'un dans l'autre, traverse-t-il la trame même du tissu? C'est ce qu'on ne peut décider d'une manière complétement satisfaisante. Au surplus, c'est dans ce passage, quel que soit le mode dont il s'effectue, que se fait la nutrition interstitielle, que s'opèrent les décompositions et recompositions qui ont lieu dans chaque point de l'organisme tant que dure la vie; c'est dans ce passage enfin qu'a lieu la transformation du sang artériel en sang veineux. Le sang, après cette transformation, arrive dans le système capillaire veineux; là, il chemine en raison de forces dont je n'ai pas à m'occuper ici; après avoir parcouru le système veineux, il arrive dans l'oreillette droite du cœur, mais il ne fait qu'y passer, car celle-ci se contracte afin de pousser le sang dans le ventricule droit, qui à son tour l'envoie dans un vaisseau qui se nomme *artère pulmonaire*, quoiqu'elle renferme du sang veineux. Elle se divise en deux branches, une pour chaque poumon. Le sang passe ainsi dans les radicules de l'artère pulmonaire; ces radicules se ramifient sur les parois des vésicules pulmonaires, et là se continuent immédiatement avec les radicules des veines pulmonaires. Ces vésicules pulmonaires sont des espèces de cellules irrégulièrement cloisonnées, et dans lesquelles l'air arrive par les ramifications des bronches. C'est donc immédiatement à travers les membranes excessivement minces qui constituent les parois des radicules du système capillaire des poumons que le sang veineux chargé de gaz acide carbonique, et qui arrive par l'artère pulmonaire, reçoit par absorption de l'air la part de l'oxygène et une certaine quantité d'azote, qui, en se dissolvant dans le sang, en chassent une partie des gaz qui s'y trouvaient. Cette opération terminée, le sang artériel passe dans les

radicules des veines pulmonaires ainsi désignées, bien qu'il s'agisse du sang artériel Les veines pulmonaires conduisent le sang artériel dans l'oreillette gauche, qui ne sert pour ainsi dire que de passage, car, en se contractant bientôt, elle envoie ce sang dans le ventricule gauche, pour voyager ensuite comme nous venons de le dire. En exposant les diverses causes qui concourent à la production de la chaleur animale, nous parlerons nécessairement des effets produits dans le mouvement circulatoire du cœur.

De l'œil.

Les anciens n'avaient aucune idée de la structure intérieure de l'œil; la description qu'ils nous en ont laissée prouve qu'ils ne s'étaient occupés que de l'extérieur et de ses propriétés générales. Dès l'instant que l'on eut analysé toutes les parties dont il se compose, on reconnut qu'il était un instrument d'optique, au fond duquel les objets extérieurs venaient peindre leur image, dont l'impulsion était portée au cerveau par un nerf particulier. Décrivons l'œil, non comme un anatomiste, mais comme un physicien qui veut se rendre compte de la marche de la lumière dans les diverses parties dont il se compose, en faisant abstraction de celles qui ne lui présentent aucune utilité.

L'appareil qui constitue l'organe de la vue se compose, chez l'homme et les animaux les plus voisins de nous, du nerf de la deuxième paire, de l'œil et de diverses parties destinées à protéger cet organe ou à le mouvoir. Le globe de l'œil (fig. 18, pl. IV), qui occupe une cavité nommée *orbite de l'œil*, se compose de plusieurs membranes, la sclérotique, la cornée transparente, la choroïde, l'iris et la rétine; d'humeurs plus ou moins liquides, telles que l'humeur aqueuse, le cristallin et l'humeur vitrée; de nerfs et de vaisseaux. Décrivons successivement ces membranes et ces humeurs dont la connaissance est indispensable pour l'interprétation des phénomènes de la vision.

La sclérotique (fig. 18, n° 28) est une membrane ferme, résistante, d'une couleur blanche nacrée, de nature fibreuse, qui enveloppe les quatre cinquièmes postérieurs de l'œil; sa face externe est convexe; sa face interne, concave, en rapport avec la choroïde, à laquelle elle n'adhère que faiblement par des vaisseaux, des nerfs et des filaments qui sont du ressort de l'anatomie. A sa partie postérieure se trouve une petite ouverture dans laquelle passe le nerf optique. En avant,

elle est percée d'une large ouverture arrondie, destinée à recevoir la cornée transparente qui semble y être enchâssée.

La cornée (fig. 18, n° 37) est enchâssée dans l'ouverture antérieure de la sclérotique; elle est à peu près circulaire, parfaitement diaphane, convexe en avant, concave en arrière; sa face antérieure est lisse et recouverte par une expansion très-fine de la conjonctive; l'autre face est revêtue par la membrane de l'humeur aqueuse. La cornée est plus épaisse que la sclérotique, et ne parait contenir ni nerfs, ni vaisseaux sanguins.

La choroïde (fig. 18, 22, n° 31), placée au-dessous de la sclérotique, est une membrane molle, d'une couleur brun foncé, et qui s'étend depuis l'entrée du nerf optique dans l'œil jusqu'au point de réunion de la cornée avec la sclérotique. En avant, elle est recouverte par le cercle ciliaire; en dedans, elle repose sur la rétine, sans lui adhérer; en arrière se trouve une ouverture arrondie dans laquelle passe le nerf optique; en avant, elle fait suite avec les procès ciliaires qui paraissent en dépendre. La constitution de la choroïde est vasculaire et celluleuse. Les procès ciliaires sont de petits replis saillants formés par la partie antérieure de la choroïde qui semble se froncer pour leur donner naissance, à mesure qu'elle s'approche de la grande circonférence de l'iris. Ils représentent une sorte d'anneau appelé *corps ciliaire*, qui est placé derrière l'iris, entoure le cristallin, et est recouvert en dehors par le cercle ciliaire.

L'iris (fig. 18, n° 34) est une membrane placée verticalement comme une cloison, à la partie antérieure de l'œil, au milieu de l'humeur aqueuse; il sépare l'une de l'autre les deux chambres de l'œil, et présente à sa partie moyenne une ouverture arrondie, appelée *prunelle* ou *pupille*. Sous l'empire de la vie, la pupille est susceptible d'être contractée ou dilatée, de manière à modérer la quantité de lumière qui entre dans l'œil. La face antérieure de l'iris (fig. 23) est colorée tantôt en bleu, tantôt en brun, en noir, en gris, etc.; la face postérieure, appelée membrane uvée, est enduite d'un vernis noir très-épais, adhérent, et qui se continue dans les intervalles des procès ciliaires.

La rétine (fig. 18, 19, n° 38) est une membrane nerveuse, grisâtre, très-molle, demi-transparente, qui se trouve au-dessous de la choroïde, et embrasse le corps vitré; elle est considérée comme l'épanouissement du nerf optique qui transmet la sensation de la lumière au cerveau, et s'étend jusque vers la circonférence du cristallin. En avant, elle s'amincit de plus en plus, se porte sur les procès ciliaires, pénètre dans

leur intervalle, et paraît finir au niveau de l'extrémité de ces plis radiés.

L'humeur aqueuse est limpide et transparente, et paraît remplir les deux chambres de l'œil, depuis la cornée jusqu'au cristallin. L'iris plonge au milieu de ce liquide; la membrane de l'humeur aqueuse est très-mince et transparente; elle tapisse toute la chambre intérieure de l'œil, et adhère très-intimement à la face postérieure de la cornée et à la face antérieure de l'iris.

Le cristallin est un corps lenticulaire transparent, placé entre l'humeur aqueuse qui est en avant, et le corps vitré qui est en arrière. Son axe correspond au centre de la pupille. Sa surface antérieure, qui est libre, est convexe, mais moins que la face postérieure, laquelle est reçue dans une excavation du corps vitré. Le cristallin est renfermé dans une capsule transparente, laquelle est attachée aux procès ciliaires et à l'ouverture antérieure de la choroïde par de petits filaments tendineux; il a une densité plus grande que celle de l'eau, et est formé de gélatine, surtout d'albumine qui se coagule par l'action du feu, des acides et de l'alcool.

Le corps vitré occupe les trois quarts postérieurs de l'œil, sous la forme d'une masse transparente ayant la consistance de la gelée; il a une forme sphérique; dans la partie antérieure se trouve une excavation qui reçoit la face postérieure du cristallin. Il est recouvert de toutes parts, excepté en avant, par la rétine qui ne lui adhère pas; il est composé de l'humeur vitrée et de la membrane hyaloïde. L'humeur vitrée a l'apparence d'une solution de gomme parfaitement diaphane, et a une densité plus grande que celle de l'eau. La membrane hyaloïde, très-mince et transparente, enveloppe l'humeur vitrée; de sa face interne partent une grande quantité de lamelles qui interceptent entre elles des espèces de cellules renfermant l'humeur vitrée.

La fig. 18, pl. IV, que nous avons prise dans le Manuel d'anatomie descriptive de M. Jules Cloquet, représente toutes les parties dont se compose l'organe de la vision.

N° 1. Partie supérieure de l'orbite. — 2. Sinus frontal gauche. — 3. Coupe de la dure-mère. — 4, 4. Diploë. — 5, 5, 5. Cavité orbitaire. — 6. Peau du front. — 7. Peau de la paupière supérieure. — 8. Cils de la paupière supérieure. — 9. Coupe du muscle surcilier. — 10. Coupe de la partie supérieure du muscle palpébral. — 11. Le cartilage tarse de la paupière supérieure. — 12. Conjonctive qui revêt en dedans la paupière supérieure. — 13. Conjonctive du globe de l'œil. — 14. Cul-de-sac formé par la conjonctive, qui se

porte de la paupière supérieure au globe de l'œil. — 15. Paupière inférieure. — 16. Cils de la paupière précédente. — 17. Coupe de la partie inférieure du muscle palpébral. — 18. Cartilage tarse inférieur. — 19. Cul-de-sac que forme la conjonctive, en se portant de la paupière inférieure sur la partie correspondante du globe de l'œil. — 20. Coupe du petit canal qui reste entre le globe de l'œil et les paupières, quand elles sont fermées. — 21, 21. Paroi inférieure de l'orbite. — 22. Muscle élévateur de la paupière supérieure. — 23. Muscle droit supérieur de l'œil. — 24. Muscle droit inférieur de l'œil. — 25. Coupe du muscle oblique inférieur de l'œil. — 26. Le nerf optique entouré de la gaîne que lui fournit la dure-mère. — 27, 27. La gaîne extérieure du nerf optique, se continuant avec. — 28, 28. La sclérotique. — 29, 29. Le névrilème du nerf optique. — 30. Substance médullaire du même nerf. — 31, 31. La choroïde. — 32, 32. Coupe du ligament ciliaire. — 33. Les procès ciliaires. — 34, 34. Face antérieure de l'iris. — 35. Pupille. — 36. Chambre antérieure de l'œil. — 37. Cornée transparente. — 38, 38, 38, 38. Rétine. — 39. Corps vitré. — 40. Cristallin. — 42. Face antérieure du même organe. — 43, 43. Face postérieure de l'œil.

Fig. 19, pl. IV. La membrane rétine appliquée sur le corps vitré, et vue par la partie postérieure.

Fig. 20. Le corps vitré enveloppé par la rétine, et conservant ses connexions avec le cristallin.

Fig. 21. Rétine appliquée sur le corps vitré.

Fig. 22. La membrane choroïde, dont les vaisseaux sont injectés (œil vu en dedans).

Fig. 23. Face antérieure de l'iris et de la choroïde (côté gauche).

Telles sont les parties de l'œil que le physicien doit connaître, s'il veut se rendre compte des phénomènes de la vision. Nous nous abstenons de parler des nerfs, des vaisseaux, dont la connaissance, comme nous l'avons déjà dit ci-dessus, ne nous serait d'aucune utilité, attendu que nous ne devons considérer seulement l'œil que sous le rapport de la vision.

De la structure de l'oreille.

L'oreille, pl. V, fig. 1, organe de l'ouïe, se compose de trois parties principales : 1° l'oreille externe, comprenant le pavillon de l'oreille et le conduit auriculaire ; 2° l'oreille moyenne, qui se compose du tympan, de la caisse et des parties qui en dépendent ; 3° l'oreille in-

terne ou labyrinthe. Nous ne décrirons de ces parties que celles dont la connaissance est indispensable pour l'explication des phénomènes de l'audition. De plus grands développements nous jetteraient dans des détails anatomiques qni ne seraient pas de notre ressort.

La structure de l'oreille externe n'a qu'nn intérêt indirect pour nous, bien que les formes curvilignes d'une partie de la conque aient été calculées par la nature pour réfléchir, le plus avantageusement possible, dans le canal auriculaire, les sons envoyés par les corps en vibration ; mais comme ces formes sont extrêmement complexes, on n'a pas cherché jusqu'ici à les déterminer géométriquement.

Les deux autres parties ont été décrites avec tant de précision, par M. Milne Edwards, dans son Cours élémentaire d'histoire naturelle, que nous nons en tenons à la description qu'il en a donnée. L'oreille moyenne comprend, avons-nons dit, le tympan, la caisse et les parties dépendantes. La caisse *h* (fig. 1) est nne cavité de forme irrégulière, qui est creusée dans la substance du rocher, et qui fait suite au conduit auriculaire, dont elle est séparée par une cloison membraneuse *g*, bien tendue et très-élastique, nommée *tympan*. Vis-à-vis de l'ouverture dans laquelle le tympan est comme enchâssé, se trouvent deux autres trous qui sont bouchés de la même manière par une membrane tendue ; on les appelle, en raison de leur forme, fenêtres ovale et ronde. A la paroi postérieure de la caisse, on voit une ouverture qui conduit dans des cellules creusées dans la portion mastoïdienne de l'os temporal, et à sa paroi inférieure on remarque l'embouchure de la trompe d'Eustache *k*, conduit long et étroit qui vient aboutir à la partie postérieure des fosses nasales, et qui établit ainsi une communication entre l'intérieur de la caisse et l'air extérieur. Enfin cette cavité est traversée par une série de petits osselets (fig. 2), qui s'étend depuis le tympan jusqu'à la membrane de la fenêtre ovale, et qui s'appuie, à l'aide d'une branche dirigée de côté, sur la paroi de la caisse. Ces os, au nombre de quatre, sout le marteau (1), l'enclume (2), l'os lenticulaire (3) et l'étrier (4). Une petite tige (5), qui peut être comparée à un manche et qui appartient au marteau, appuie sur le tympan et la base de l'étrier et repose aussi sur la membrane de la fenêtre ovale. Enfin des petits muscles *f*, *k*, fixés à ces osselets, leur impriment des mouvements par suite desquels ils pressent plus ou moins fortement sur ces membranes, et augmentent ou diminuent par conséquent leur degré de tension. L'oreille interne, fig. 2, de même que l'oreille moyenne, est renfermée tout entière dans le rocher. Elle se compose de plusieurs cavités qui communiquent toutes entre elles, et que l'on

nomme le vestibule (10), les canaux semi-circulaires (9), et le limaçon (7). Le vestibule *l*, fig. 1, en occupe la partie moyenne et communique avec la caisse par la fenêtre ovale. Les canaux semi-circulaires s'élèvent de la face supérieure et postérieure du vestibule : ils sont au nombre de trois et ont la forme de tubes arrondis et renflés en forme d'ampoule à une de leurs extrémités. Enfin, le limaçon est un organe très-singulier, qui est contourné en spirale, comme la coquille de l'animal dont il porte le nom ; sa cavité est divisée en deux parties par une cloison longitudinale, moitié osseuse, moitié membraneuse ; elle communique avec l'intérieur du vestibule, et n'est séparée de la caisse que par la membrane de la fenêtre ronde (8). Cette dernière cavité est remplie d'air ; l'oreille interne, au contraire, est remplie d'un liquide aqueux, et la membrane qui tapisse le vestibule, ainsi que les canaux semi-circulaires, n'est pas appliquée contre les parois osseuses de ces cavités, mais comme suspendue dans leur intérieur.

La fig. 2 est le labyrinthe ; la fig. 3 la membrane du tympan et les osselets.

Structure du larynx.

Il a la forme d'un cône renversé (fig. 4, pl. V), dont le plus petit diamètre est en bas et en communication avec la trachée-artère. Le larynx a deux surfaces, l'une externe, l'autre interne ; et deux extrémités, l'une supérieure et l'autre inférieure. La surface extérieure n'ayant aucune utilité pour le physicien, nous n'en parlerons pas. Il n'en est pas de même de la surface intérieure (1) ; elle est revêtue dans toute son étendue par une membrane muqueuse ; vers le bas, elle est formée d'un cartilage qui offre, comme lui, une forme annulaire, et ne peut changer de dimension ; vers le milieu se trouvent, de chaque côté, les cordes vocales ou ligaments inférieurs (2) de la glotte, lesquels sont formés de ligaments et de fibres musculaires recouverts de membranes muqueuses. Au-dessus des cordes vocales il existe deux cavitées allongées, plus ou moins profondes, appelées *les sinus ou ventricules du larynx* (3). Ces ventricules sont bornés en haut par un repli (4) de la membrane muqueuse qui est parallèle aux cordes vocales, et qu'on appelle le ligament supérieur de la glotte ; l'intervalle compris entre les ligaments supérieur et inférieur d'un côté, et ceux du côté opposé, est ce qu'on appelle *la glotte* (5).

L'épiglotte (6) est une espèce de languette fibro-cartilagineuse placée au-dessus de l'ouverture supérieure du larynx ; elle est fixée

par sa base au-dessous de la racine de la langue, et s'élève obliquement dans l'arrière-bouche; mais elle peut s'abaisser et couvrir la glotte.

Des globules constitutifs des tissus organiques, et des globules du sang et de diverses sécrétions.

On a pu voir, d'après les détails dans lesquels nous sommes entrés relativement à la structure des muscles et des nerfs, que ces organes, du moins les muscles, paraissent avoir pour molécules constitutives des globules, et qu'il est probable que c'est à cette cause que l'on doit attribuer les formes arrondies que les corps organisés affectent ordinairement; ils ne prennent, en effet, de formes polyédriques que dans des cas particuliers, et lorsque l'animal vivant n'est pas sain. La réunion des molécules organiques donne naissance à des formes compatibles avec les fonctions que doivent remplir les organes ou tissus qui en résultent. C'est ainsi que les tuniques des artères et des veines se roulent en tubes; la fibrine, qui est la partie constituante des muscles, s'allonge en fibres rapprochées les unes des autres; le tissu cellulaire s'épanouit en feuilles minces, membraneuses, etc. Tous ces corps, nous le répétons, vus au microscope, paraissent constituer une trame de petits corpuscules sphériques que l'on considère comme les molécules organiques constitutives.

Passons en revue les globules organiques dans le système musculaire, le système nerveux, le système vasculaire et les liquides transportés dans les organes, enfin dans diverses sécrétions. Nous avons déjà parlé des globules de la fibre élémentaire dans les muscles, ainsi nous n'y reviendrons pas. Quant aux nerfs, on sait seulement qu'en soumettant au microscope d'un fort grossissement la matière cérébrale, elle paraît composée de globules de graisse et de globules d'albumine. On n'a reconnu aucune différence bien prononcée entre la composition du sang artériel et celle du sang veineux. Une goutte de sang, vue au microscope, paraît remplie de particules plates, minces et translucides, nageant dans une liqueur jaune. Quand on soumet à l'expérience la membrane natatoire de la patte d'une grenouille ou la membrane de l'aile d'une chauve-souris, on reconnait que le sang marche dans les vaisseaux les plus déliés, et que les globules qui s'y trouvent se tournent tantôt d'un côté, tantôt de l'autre, ce qui ne permet pas d'admettre qu'ils soient sphériques. On croyait jadis que ces globules étaient formés par la

matière colorante du sang; mais M. Young a prouvé qu'on pouvait les séparer de cette matière, et qu'ils continuaient alors à nager dans l'eau pure ou dans le sérum. La composition organique de ces globules a occupé divers physiciens. Home avait annoncé qu'ils étaient composés d'une molécule de fibrine incolore, entourée d'une pellicule de matière colorante rouge, qui cessait d'envelopper la fibrine quelque temps après que le sang était tiré. MM. Prévost et Dumas confirmèrent cette observation, et montrèrent, en outre, que les globules sont circulaires chez les mammifères, elliptiques chez les oiseaux et les animaux à sang froid, et que, dans une même espèce animale, les globules avaient la même grosseur, tandis qu'ils variaient avec les espèces : à l'égard de la différence qui existe entre le sang artériel et le sang veineux, le premier contient un pour cent de son poids de globules de plus que le sang veineux; que le sang des oiseaux est le plus riche en globules; parmi les mammifères, les carnivores en ont plus que les herbivores; et qu'enfin les animaux à sang froid sont ceux qui en ont le moins.

Nous donnons ici, d'après M. Mandl, le diamètre des globules du sang d'un certain nombre d'animaux.

Diamètre exprimé en fractions de millimètre.

Homme	$\frac{1}{125}$
Chien	$\frac{1}{150}$
Kanguroo	$\frac{1}{133}$
Éléphant d'Afrique	$\frac{1}{100}$
Tapir	$\frac{1}{160}$
Cerf de l'Inde	$\frac{1}{150}$
Girafe	$\frac{1}{160}$
Bouc de l'Inde	$\frac{1}{300}$
Mouton d'Astrakan	$\frac{1}{275}$
Mouton d'Écosse	$\frac{1}{250}$
Mouton de Norwége	$\frac{1}{300}$
Dromadaire	$\frac{1}{125}$
Alpaca	$\frac{1}{125}$
Perroquet	$\frac{1}{90}$
Paon	$\frac{1}{87}$
Tourterelle	$\frac{1}{80}$
Murœna anguilla	$\frac{1}{75}$
Cyprinus carpio	$\frac{1}{60}$

Grenouille	$\frac{1}{45}$
Salamandre	$\frac{1}{30}$
Astacus fluviatilis	$\frac{1}{350}$
Helix pomatia	$\frac{1}{450}$.

L'éléphant est, de tous les quadrupèdes, celui dont les globules sont les plus gros; mais ils sont moindres cependant que les globules des oiseaux.

Pour observer les globules, il suffit de mettre une goutte de sang sur le porte-objet du microscope, immédiatement après la sortie du vaisseau, et de l'étendre en appliquant un verre dessus; il ne faut pas exercer une forte pression, crainte de déformer les globules. Il faut, pour observer le sang de l'homme, éviter d'y ajouter de l'eau et d'employer un réactif qui les déformerait. Il est indispensable encore d'étudier ces globules sur les animaux vivants, attendu, d'une part, que la coagulation plus ou moins rapide du sang est un obstacle, et que, de l'autre, la putréfaction et les réactions chimiques qui suivent la mort les déforment.

Les liquides qui remplacent le sang dans les animaux à sang froid contiennent également des globules, mais qui sont privés d'enveloppe colorée. D'après MM. Milne-Edwards et Audouin, dans ces liquides, les globules ont l'apparence de vésicules membraneuses, de volume différent, et beaucoup plus grosses que chez les animaux à sang chaud. On a annoncé encore que le nombre de globules contenus dans le sang, la rapidité avec laquelle ce dernier circule et la fréquence de la respiration, avaient des rapports avec la température des animaux. En effet, les oiseaux qui ont le plus de globules sont ceux chez lesquels la température est la plus élevée et la respiration la plus active; viennent après eux les mammifères. On ne peut néanmoins ériger en loi ce rapport; car le singe, qui a plus de globules de sang, un pouls plus accéléré, une respiration plus rapide que l'homme, a cependant une température moins forte que ce dernier; le cheval, qui a presque les deux tiers des globules de l'homme, a presque la même température. On n'a pas reconnu jusqu'ici, dans la lymphe, de globules organiques. Quant au chyle, qui a de l'analogie avec la lymphe, on y a reconnu une foule de globules de graisse qui se coagulent.

M. Donné, qui a fait une étude toute spéciale des globules sécrétés par divers organes, en distingue trois espèces d'une structure et d'une composition identiques sous le rapport de leurs caractères physiques et chimiques. Ces trois espèces de globules sont les globules muqueux

contenus dans le mucus, sécrétés par les membranes muqueuses proprement dites, les globules blancs du sang et les globules du pus. Ces trois sortes de globules sont composés, suivant M. Donné, d'une vésicule arrondie, contenant dans son intérieur de petits globulins, au nombre de trois ou quatre, et ayant moins de $\frac{1}{100}$ de millimètre de diamètre. Leur surface est légèrement granuleuse et leur contour un peu frangé; ils sont blancs, sphériques, et jouissent de plusieurs propriétés chimiques, entre autres d'être solubles dans l'ammoniaque au bout d'un certain temps, tandis qu'ils sont insolubles dans l'acide acétique. La seule différence que l'on puisse observer entre ces trois espèces de globules, est que les globules blancs du sang sont d'une texture délicate, moins résistants aux agents extérieurs que ceux du pus, par exemple, et que les globules du mucus sont liés entre eux par une matière visqueuse que l'on ne retrouve ni dans le sang, ni dans le pus. M. Donné, vu cette analogie de structure, ne pense pas qu'il y ait également analogie et identité d'origine et de nature entre ces trois espèces de globules; cette similitude ne dépend que du mode de formation de ces globules qui est uniforme. Voici la loi qu'il établit à cet effet : Les petits globulins, tels qu'ils existent dans beaucoup de liquides et dans le chyle en particulier, ont la propriété, quand ils viennent à rouler dans un liquide albumineux, de s'envelopper d'une couche albumineuse en forme de vésicule; telle est, suivant lui, l'origine de la vésicule primitive et des trois espèces de globules mentionnées précédemment. Ce mode de formation s'applique non-seulement aux globulins du chyle arrivant dans le sang, mais encore très-probablement aux globules du mucus et du pus. Toutes les membranes dites *muqueuses* ne sécrètent pas des globules muqueux. M. Donné en distingue deux espèces; les muqueuses proprement dites, sécrétant de véritables globules muqueux, et des fausses membranes muqueuses qui ne sont que des replis de la peau. D'après l'étude qu'il a faite de ces membranes, il a reconnu que toute membrane muqueuse sécrétant un mucus à globules est alcaline, et les globules sont dans ce cas un véritable produit de sécrétion. Toute membrane fournissant un mucus à lamelles épidermiques est acide, et les lamelles ne sont que le produit de la desquamation de l'épiderme. Il distingue encore cependant une troisième membrane intermédiaire entre les deux précédentes, qui participe en partie des propriétés de la peau et des muqueuses. Elle existe près des orifices, à l'endroit où la peau commence à changer de nature. Le produit de la sécrétion de cette membrane est composé en partie de lamelles épidermiques, et en partie de glo-

bules muqueux ; il est tantôt acide, tantôt alcalin, suivant la prédominance des uns ou des autres. Il ne nous reste plus à parler que des globules du lait qui, d'après M. Donné, sont parfaitement transparents au centre, très-nets dans leurs contours, de différents diamètres, $\frac{1}{1000}$ de millimètre jusqu'à peut-être $\frac{1}{100}$ et plus ; avec les réactifs ils se comportent comme la matière grasse, et sont en effet constitués par la partie butyreuse du lait dans lequel ils existent tout formés en plus ou moins grand nombre suivant sa richesse, et constituent la crème par leur réunion à la surface du lait ; ils nagent dans le sérum, où le caséum est en dissolution. C'est à la suspension de ces globules que le lait doit sa couleur blanche ; on peut, en effet, filtrer du lait de manière à laisser les globules sur le filtre ; le liquide qui passe est tout à fait clair comme de l'eau. M. Donné pense que le lait ne présente pas cette constitution dès sa formation dans les mamelles. Le lait primitif ou *calostrum* est caractérisé par la présence de corpuscules particuliers auxquels il a donné le nom de *corps granuleux* ou *calostrum.*

Anatomie de la grenouille et de la torpille.

Pour compléter ce qui concerne les connaissances relatives à la constitution moléculaire des corps dont on a besoin pour l'étude de la physique appliquée, nous allons donner une anatomie de la grenouille, animal par excellence pour l'étude des contractions musculaires. Cette anatomie consistera seulement dans l'énoncé des muscles et la désignation des principaux organes.

La fig. 5, pl. V, représente une grenouille dont tous les organes ont été mis à nu, et dont voici la désignation :

A. *a*, appendices qui ressemblent à des espèces de feuilles.
i, intestin rectum.
r, *r*, *r*, *r*, rate.
t, *t*, testicule.
v, *s*, vésicule séminale.
v, *u*, vessie urinaire.

B. *i*, intestin rectum.
l, circonvolutions des intestins.
t, *t*, testicule.
v, *s*, vésicule séminale.
v, *u*, vessie nrinaire.
a, *a*, aorte, ramifications de l'aorte.

c, cœur.
e, estomac.
f, foie.
i, intestin rectum.
l, circonvolutions des intestins.
p, poumons.
r, rate.

Désignation des muscles.

Fig. 6, muscles de la face dorsale
Fig. 7, muscles de la face ventrale.

1. Inter-maxillaire.
2. Sus-maxillo-pré-nasal.
3. Sus-maxillo-post-nasal.
4. Sous-mentonnier transverse.
5. Orbito-palpébral antérieur.
6. Orbito-palpébral extérieur.
7. Pré-sus-orbito-oculaire.
8. Post-orbito-oculaire.
9. Fronto-ptérygoïdien.
10. Orbito-post-oculaire.
11. Pré-sous-orbito-oculaire.
12. Post-orbito-sous-oculaire.
13. Post-orbito-in-oculaire.
14. Post-orbito-ex-oculaire.
15. Sous-maxillaire ou sous-guttural.
16. Génio-hyoïdien.
17. Sterno ou xyphohyoïdien.
18. Interscapulo-hyoïdien.
19. Rupeo-cerato-hyoïdien.
20. Hyo-glosse.
21. Sphincter.
22. Zygomato maxillaire.
23. Sub-occipito-dorso-angulaire.

24, 25, 26, 27, 28, 29. Masse des muscles surpinaux.

30. Transverso-iliaque.
31. Pubio-thoracique.
32. Abdomino-guttural.

33. Dorso-sous-abdominal.
34. Iléo-transverso-sous-sternal.
35. Tibio-dorso-cutané.
36. Coxis-dorso-cutané.
37. Sous-occipito-adscapulaire.
38. Limbo-adscapulaire.
39. Xypho-adscapulaire.
40. Lombo-huméral.
41. Pré-sterno-scapulo-huméral.
42. Abdomino-huméral.
43. Pré-sterno-clavi-radical.
44. Scapulo-bi-humero-olécranien.
45. Epicondilo-sous-carpien.
46. Huméro-sus-digital.
47. Epitro-dilo-sous-phalangetien.
48. Ex-ilio-tranchantérien.
49. Sous-ilio-fémural.
50. Sous-eschio-pubi-fémoral.
51, 52, 53, 54. Pelvi-fémuro-rotuliens.
55. Sur-ischio-poplite.
56. Sous-ischio-tibial.
57. Post-ischio-tibial-profond.,
58. Bis-ischio-tibial.
59. Pré-fémuro-tibial.
60, 61. Pré-fémuro-astragaliens.

Les organes électriques de la torpille devant avoir un intérêt particulier pour le physicien, nous allons en donner, d'après M. Breschet, une anatomie assez détaillée.

Il existe, de chaque côté de la bouche et des voies respiratoires, un organe de forme semi-lunaire, composé d'une multitude de prismes généralement à six pans, disposés parallèlement les uns aux autres et perpendiculairement au sol. Ces prismes, qui sont plus longs vers la partie moyenne que vers les extrémités, donnent à cet organe une épaisseur plus considérable dans son milieu que vers les bords. En avant et au-devant de l'organe olfactif, les deux corps prismés sont en contact l'un avec l'autre, au moyen d'un tissu intermédiaire composé de cellules de plus en plus petites, dans lesquelles se trouve un tissu entièrement semblable à celui qui constitue les prismes.

L'organe entier est enveloppé d'une membrane de nature fibreuse, peu adhérente aux parties voisines, dont on l'isole avec la plus

grande facilité. Elle s'insère en dehors sur plusieurs pièces cartilagineuses disposées en arc de cercle et articulées les unes avec les autres. Des muscles insérés sur cet arc cartilagineux peuvent, les uns, comprimer l'organe, les autres, produire un effet inverse. De la face interne de la tunique fibreuse qui enveloppe de toutes parts l'organe partent des cloisons également fibreuses, dans l'épaisseur desquelles se ramifient une foule prodigieuse de filets nerveux. Les cloisons fibreuses forment autant d'alvéoles semblables à ceux d'un rayon de miel, avec cette différence, cependant, que les alvéoles de l'organe électrique sont fermés de toutes parts; les cloisons sont tellement disposées, qu'elles appartiennent à deux prismes à la fois. D'après cela, chaque prisme, quoique entièrement isolé des autres, n'a pas une tunique propre.

C'est aux points de réunion des cloisons, c'est-à-dire, aux endroits où trois de ces cloisons se réunissent, que se trouvent placés les nerfs et les vaisseaux qui pénètrent dans l'intérieur de l'alvéole; c'est aussi à ces angles que le prisme est adhérent, tandis qu'il paraît entièrement isolé du reste des cloisons.

La structure des prismes, qu'on a un si grand intérêt à connaître, puisqu'elle peut jeter quelque lueur sur l'usage que fait la torpille de son organe prismé pour lancer la commotion, a attiré aussi l'attention de M. Breschet. Suivant cet habile anatomiste, des filets nerveux traversent les cloisons au niveau des angles, et se perdent dans les prismes qui ne sont pas de nature nerveuse. Quant aux vaisseaux, comme ils ne sont pas pour nous d'un intérêt direct, je n'en fais pas mention ici.

Voici l'aspect que présentent les prismes : si l'on fend la cloison longitudinalement, et qu'on la déjette sur les côtés, de manière à mettre à nu une des faces du prisme, on voit sur cette face une foule de stries transversales liées entre elles par un tissu cellulaire extrêmement tenu et transparent. Les stries n'indiquent pas des lamelles isolées et superposées les unes sur les autres, comme les éléments d'une pile voltaïque, mais tout est lié ensemble, et forme une masse presque homogène et amorphe, dans laquelle on ne distingue que des stries un peu plus opaques que le reste, que l'on suppose être nerveuses, attendu que leur point de départ correspond aux angles de réunion des cloisons, où l'on voit pénétrer les filets nerveux. La grande quantité de filets nerveux qui pénètrent dans l'intérieur de l'organe tend à confirmer cette manière de voir.

La fig. 9, pl. V, représente une torpille vue sur la partie dorsale.

Les figures 8, 9 présentent les diverses parties que nous venons de décrire.

Fig. 8 : moitié latérale droite de la torpille.

Vue par sa face inférieure : les téguments ont été enlevés pour faire voir l'organe électrique.

A, extrémité du corps de l'animal et ligne médiane.

B, boucles.

C, narines.

DDDD, muscles de l'appareil buccal.

EE, muscles de l'appareil respiratoire.

F, ouverture des branchies.

GGG, organe électrique.

G', partie antérieure de cet organe, au moyen de laquelle il communique avec celui du côté opposé.

HH, bord interne de l'organe électrique, où l'on voit la forme et la hauteur respectives des prismes.

IIII, cordons nerveux, qui se distribuent en entier dans l'organe électrique.

J, arc cartilagineux, qui donne insertion à l'enveloppe de l'organe électrique.

K, muscle s'insérant dans cet arc cartilagineux.

XXX, lambeaux de peau.

Fig. 10 : portions de prisme isolé et dépouillé de ses enveloppes; les stries y sont indiquées.

Fig. 11 : ce dessin représente les enveloppes, ou plutôt la cloison séparant les prismes, avec les filaments fibreux, qui sont d'un blanc éclatant, et les filets nerveux, qui sont d'un blanc grisâtre.

Nous avons exposé dans ce livre de la constitution moléculaire des corps les connaissances nécessaires pour l'étude de la physique appliquée à la chimie, à la physiologie, et aux sciences naturelles. De plus grands développements nous ont paru inutiles pour atteindre notre but et ne pas dépasser le cadre que nous nous étions tracé.

LIVRE II.

DES FORCES PHYSIQUES ET CHIMIQUES QUI PRÉSIDENT A LA CONSTITUTION DES CORPS.

CHAPITRE PREMIER.

De l'Électricité.

Après avoir indiqué quelles étaient les forces qui présidaient à la constitution des corps inorganisés, nous allons actuellement étudier leurs propriétés, leurs rapports et leur mode d'action. Mais pour atteindre ce but, il faut, pour ainsi dire, s'en rendre maître et les isoler ; ces forces sont : l'électricité, la chaleur, la lumière, les affinités et la force d'agrégation. Nous commencerons par l'électricité, qui, tour à tour, devenant chaleur, lumière, force chimique, force d'agrégation, se présente à nous avec tous les caractères d'un principe universel ; au surplus, un autre motif nous engage à en agir ainsi ; l'électricité fournit une foule de moyens d'expérimentation dont nous avons besoin pour étudier les autres agents.

Un tube de verre, dont la surface est bien sèche, ou un morceau de résine frotté avec du drap ou une étoffe de laine, acquiert la propriété d'attirer les corps légers qu'on lui présente : on dit alors que le corps est *électrisé*. Si l'on fait toucher le morceau frotté à une petite balle de sureau suspendue à un fil de soie, la balle est aussitôt repoussée, tandis que si on lui présente l'autre corps frotté, elle est attirée. On conclut de là, 1° qu'un corps électrisé en attire un autre qui ne l'est pas ; 2° qu'un corps électrisé cède une portion de son électricité à celui qui le touche ; 3° que deux corps qui possèdent la même électricité se repoussent ; 4° que ces corps s'attirent quand ils ont, l'un l'électricité provenant du verre, l'autre celle fournie par la

résine. La première est appelée électricité *vitrée* ou *positive;* la seconde, *électricité résineuse* ou *négative*. L'expérience démontre, en outre, que le corps frotté possède toujours uue électricité contraire à celle du frottoir; que si l'on maintient le contact entre ces deux corps pendant plus ou moins de temps, ils perdent l'un et l'autre la faculté que le frottement leur avait fait acquérir; on dit alors qu'il y a recomposition des deux électricités, ou formation de fluide naturel. Cette recomposition a encore lieu, lors même que les corps ne se touchent pas, quand ils possèdent chacun une quantité d'électricité suffisante pour vaincre la résistance de l'air; dans ce cas, la recomposition s'opère avec dégagement de lumière. Dans la théorie où l'on suppose l'électricité un fluide impondérable, le fluide naturel est lui-même un agent impondérable; daus celle où l'on admet que l'électricité soit le résultat des vibrations de l'éther, le fluide naturel exprime seulement l'état de repos de l'éther. Quant à nous, nous supposerons l'électricité un fluide impondérable, afin d'arriver à une explication plus facile des phénomènes d'électricité statique.

Si l'on suspend la petite balle de sureau à un fil très-fin de métal, au lieu d'un fil de soie ou de verre, et qu'on lui présente un corps électrisé, il y a de même attraction; mais elle n'est pas suivie de répulsion après le contact. La soie et le métal ne jouissent donc pas de la même propriété. Le métal donne écoulement à l'électricité dans la terre, appelée le *réservoir commun,* tandis que la soie, la résine, le verre s'opposent à son passage. Il existe donc des corps bons conducteurs de l'électricité et des corps mauvais conducteurs ou isolants. Les premiers sont: l'or, l'argent, le cuivre, le platine, le zinc, le fer, l'étain, le plomb, etc.; l'anthracite, la plombagine, le coke parfaitement cuit, et le charbon, quand aussi il a subi un degré de cuisson suffisant; le fusain qui n'a éprouvé qu'une demi-carbonisation n'est pas conducteur; viennent ensuite les pyrites, la galène, le peroxyde de manganèse, puis les dissolutions acides, salines, etc.; mais le pouvoir conducteur de celles-ci est de plusieurs milliers de fois moindre que celui des métaux. Les corps mauvais conducteurs sont: le verre, la résine, le soufre (ce dernier est regardé comme le plus mauvais conducteur), les liquides oléagineux, les matières grasses. La conductibilité peut dépendre de l'état moléculaire, comme le diamant, l'anthracite et le coke en sont des exemples; le premier est isolant, tandis que les deux autres sont conducteurs. Pour conserver à un corps conducteur l'électricité qu'on lui a donnée, il faut donc le placer sur un morceau de verre, de résine ou de soufre; mais de préférence sur l'un

des deux derniers, attendu que le verre, comme les corps polis, se recouvre promptement d'une couche d'eau hygrométrique qui le rend conducteur, à moins que préalablement on ne le chauffe fortement. La présence de l'eau hygrométrique sur la surface des corps mauvais conducteurs est un obstacle, non-seulement pour qu'ils servent d'isoloirs, mais encore pour qu'ils soient électriques par frottement; c'est pour ce motif que les expériences sur l'électricité libre ne réussissent bien que dans les temps secs et froids. L'air et les gaz qui sont isolants n'agissent que par leur pression, jusqu'à un certain degré, cependant, pour maintenir l'électricité à la surface des corps conducteurs; on le prouve en plaçant un corps électrisé sous le récipient d'une machine pneumatique : ce corps perd peu à peu son électricité à mesure qu'on enlève l'air; mais, lors même que le vide est aussi parfait que possible, les corps peuvent conserver encore une certaine quantité d'électricité, comme nous le démontrerons.

Propriétés générales de l'électricité statique et de l'électricité dynamique.

Nous n'avons nullement l'intention d'exposer complétement les propriétés générales de l'électricité, puisque nous avons publié un traité complet dans lequel elles sont exposées, mais bien de faire connaître celles dont la connaissance est indispensable pour la construction et l'emploi des appareils destinés à étudier le dégagement de l'électricité dont nous allons nous occuper d'une manière spéciale.

Deux corps librement suspendus, électrisés de la même manière, se repoussent, tandis qu'ils s'attirent s'ils possèdent des électricités contraires; cette répulsion ou cette attraction est d'autant plus forte que les corps sont plus rapprochés et qu'ils possèdent une plus grande quantité d'électricité. Coulomb a prouvé au moyen de la balance de torsion que ces actions ont lieu en raison directe des quantités d'électricité possédées par chaque corps, et en raison inverse du carré de leur distance, loi qui est la même que celle qui régit les attractions célestes.

On a vu précédemment que lorsqu'un corps électrisé est touché par un autre, celui-ci enlève au premier une portion de son électricité. Cette quantité dépend de l'étendue de la surface; si ce corps est mis en communication avec la terre, la quantité d'électricité qui lui reste est tellement atténuée qu'elle n'est plus sensible. On l'évalue au moyen de sa tension. La tension est la résultante des actions répulsives qu'exercent les unes sur les autres les molécules de l'électricité

libre répandues à la surface d'un corps; elle est donc proportionnelle à la densité du fluide, c'est-à-dire, au nombre de molécules renfermées dans un espace donné; de plus, l'expérience a démontré que la force totale de l'attraction ou de la répulsion de deux corps électrisés varie pour chaque distance dans le même rapport que les quantités d'électricité propres à chacun d'eux; leur réaction est donc proportionnelle au produit de ces deux quantités.

Passons à la quantité d'électricité qu'un corps isolé et électrisé perd dans un temps donné par le contact de l'air plus ou moins humide, et par des supports plus ou moins isolants. On a vu qu'il n'existait ni corps parfaits conducteurs, ni corps parfaitement isolants; que les métaux étaient les meilleurs, ensuite les liquides, et qu'enfin les plus mauvais étaient le verre, la résine, etc., etc. Cela posé, deux causes influent sur la perte de l'électricité que possède un corps électrisé: la première est la nature des supports, qui n'isolent jamais parfaitement; la seconde, l'air, qui, étant toujours chargé d'humidité, dépose une petite couche d'eau hygrométrique sur les supports, et les rend conducteurs. De plus, un corps électrisé est enveloppé par l'air atmosphérique, qui est plus ou moins isolant, suivant la nature de ses parties constituantes et les molécules aqueuses qu'il renferme. Chaque molécule de l'air qui touche un corps électrisé se charge plus ou moins rapidement de l'électricité de ce corps; cette molécule est aussitôt chassée par suite de la répulsion qui a lieu entre deux corps chargés d'électricité de même nature; elle est remplacée par une autre qui s'électrise, et qui est ensuite elle-même repoussée, ainsi de suite. C'est ainsi que l'électricité possédée par un corps peut se répandre entièrement dans une atmosphère renfermant des vapeurs aqueuses. D'après les observations de Coulomb, le rapport de la force électrique perdue à la force totale, pour le même état d'humidité de l'air, est une quantité constante; ce rapport ne varie que quand l'hygromètre annonce une variation; et, pour un même état de l'air, la perte de l'électricité est toujours proportionnelle à la densité électrique. Relativement à la loi que suit la perte de l'électricité le long des supports isolants, il a reconnu, en cherchant le degré de réaction électrique auquel chacun des supports commence à isoler parfaitement, que le degré de cette réaction est proportionnel à la racine carrée de leur longueur; ainsi, pour le même état de l'air, un support d'une longueur quadruple isole parfaitement une quantité double d'électricité. Nous ajouterons cependant que cette loi ne se vérifie qu'avec des supports très-fins, de même nature, et de même diamètre, ne différant que

par la longueur; toutefois, en s'appuyant sur cette loi, Coulomb a trouvé que pour des fils de gomme laque et de soie de même longueur et de même diamètre, l'intensité de la réaction électrique, à laquelle l'isolement commence, est dix fois plus forte pour la première substance que pour la seconde.

Coulomb a reconnu, en outre, que, lorsque la densité électrique du corps n'est pas considérable, un petit cylindre de cire d'Espagne ou de gomme laque de $1^{mm},125$ de diamètre, et d'une longueur de $0^{m},530$, suffit pour isoler parfaitement une balle de sureau de $13^{mm},535$ de diamètre; et que, lorsque l'air est très-sec, un fil de soie très-fin passé dans de la cire d'Espagne bouillante, et ne formant qu'un petit cylindre de $0^{mm},500$ de diamètre et de $0^{m},15$ de longueur, remplit le même but, tandis qu'un fil de verre tiré à la lampe d'émailleur, bien que de même longueur, n'isole la balle que lorsque le temps est très-sec et que le corps est faiblement électrisé.

Quand on s'occupe des phénomènes d'électricité statique, il faut avoir une idée complète de la quantité d'électricité que possède un corps, et de sa distribution à sa surface; car la couche électrique n'est pas la même dans toutes les parties, si le corps n'est pas sphérique. C'est une question qui a beaucoup occupé Coulomb et dont il a donné la solution.

Les anciens physiciens, depuis Beccaria, ont reconnu que toute l'électricité transmise à un corps se porte à sa surface. Coulomb avança de plus que le fluide électrique n'est retenu sur la surface de ce corps par aucune affinité chimique ou par une attraction élective; qu'il n'y est maintenu que par la pression de l'air atmosphérique, et qu'il ne se partage entre différents corps, mis en contact, qu'en raison de son action répulsive. Pour faire ses observations, Coulomb se servit d'un petit plan d'épreuve en clinquant fixé à un cylindre isolant en gomme laque. Il touchait chaque point de la surface du corps électrisé avec le plan d'épreuve, et reportait celui-ci dans la balance de torsion (*) pour déterminer la quantité d'électricité enlevée; il comparait ensuite facilement l'état électrique des diverses parties du corps électrisé. C'est ainsi qu'en opérant avec une sphère de métal creuse, dans laquelle une ouverture était pratiquée, en y introduisant le petit disque d'épreuve, et se mettant en garde contre les actions par influence, exercées par les parois de l'ouverture, il reconnut que la surface intérieure de la sphère ne possédait pas l'électricité. On conçoit très-

(*) *Traité d'électricité et du magnétisme*, t. II, p. 9.

bien que lorsque l'on met un corps électrisé en contact avec un autre corps, identique de forme, ayant la même conductibilité, les deux corps se chargent de la même manière, et que, dès lors, l'affinité chimique n'entre pour rien dans la distribution de l'électricité.

Ayant admis que le fluide électrique n'était retenu à la surface du corps que par la pression de l'air ambiant, Coulomb dut le considérer comme formant sur les corps conducteurs une couche très-mince, dont la surface extérieure était la même que celle du corps, tandis que la surface intérieure n'en différait qu'infiniment peu. L'épaisseur de cette couche, que l'on reconnait en touchant avec le plan d'épreuve et la balance de torsion, est la tension électrique en ce point; bien entendu que, si l'on veut avoir des résultats exacts, il faut avoir l'attention d'opérer avec assez de rapidité pour que le disque d'épreuve ne perde pas sensiblement d'électricité pendant toute la durée des expériences. Ce disque, en raison de ses petites dimensions, ne diminue pas sensiblement la quantité d'électricité que possède le corps après le contact. Nous ajouterons encore, d'après les expériences de Coulomb, que la quantité d'électricité prise au corps par le plan d'épreuve peut être considérée comme proportionnelle à celle du point touché, mais avec cette condition, toutefois, que ce plan, au moment de la séparation, enlève une quantité d'électricité double de celle du point de la surface touchée. En promenant le plan d'épreuve sur la surface d'un cylindre de laiton isolé, terminé par deux sphères, Coulomb reconnut que vers les extrémités la densité électrique était plus considérable que vers le milieu, et qu'elle variait peu depuis le milieu du cylindre jusqu'à huit centimètres de son extrémité. En soumettant à l'expérience une lame mince et isolée d'acier, de $0^{m},297$ de longueur, de $0^{m},027$ de large, et de $2^{mm},256$ d'épaisseur, il a vu que le rapport entre les quantités d'électricité, prises au milieu et aux extrémités, était double; que ce rapport, après avoir été presque constant jusqu'à un peu plus de $0^{m},027$ des extrémités, augmentait ensuite rapidement, et qu'en plaçant le plan d'épreuve dans le prolongement, et touchant l'épaisseur de la lame par son tranchant seulement, la tension était quadruple de celle du milieu. Enfin, Coulomb a observé que l'augmentation de la tension vers les extrémités se retrouve dans les corps prismatiques ou cylindriques très allongés, et qu'elle est d'autant plus grande que ces corps sont plus minces; que lorsqu'un cylindre s'amincit en allant vers les extrémités, l'accroissement de l'électricité devient de plus en plus rapide, et que si

le cylindre se termine en pointe, l'accumulation est si forte, que l'électricité ne pouvant plus être retenue par la résistance de l'air, s'échappe alors sous la forme d'aigrettes lumineuses, quand la tension primitive, toutefois, est suffisante. Telle est l'explication de la propriété que possèdent les pointes métalliques placées à peu de distance des machines électriques, de soutirer l'électricité qui se dégage continuellement. Nous sommes amenés à parler de l'action par influence exercée par un corps électrisé sur un corps à l'état naturel, qui en est plus ou moins éloigné.

Lorsque l'on place un corps électrisé, un cylindre de laiton, par exemple, à peu de distance d'un autre cylindre isolé dans l'état naturel, et qu'on touche le premier en différents points, avec un plan d'épreuve, on reconnaît qu'il exerce sur l'électricité naturelle du second une action qui dissimule l'effet de son électricité libre, et rend l'autre électrique; l'action par influence décompose le fluide neutre du corps non électrisé, en sépare les deux électricités, qui se recombinent aussitôt que l'on éloigne les deux corps. Supposons, par exemple, que le corps électrisé possède l'électricité positive, cette électricité décompose l'électricité naturelle du second cylindre, attire la négative dans les parties les plus rapprochées, tandis que la positive est repoussée dans les points les plus éloignés; si l'on touche ceux-ci avec le doigt, on enlève alors toute l'électricité positive, et il ne reste plus au cylindre que l'électricité négative, dont l'action est dissimulée par celle de l'électricité positive de l'autre corps; mais si l'on retire ce dernier, le cylindre se trouve avoir acquis un excès d'électricité négative: on dit alors que le corps est *électrisé par influence;* les effets croissent avec l'intensité de l'électricité communiquée au premier cylindre. Cette expérience prouve que tous les corps possèdent entre leurs molécules une quantité d'électricité naturelle qui est énorme, puisque, quelque intense que soit l'électricité du cylindre, celle dégagée par influence est toujours en rapport avec elle. Nous passons sous silence tous les effets résultant de l'action par influence d'un corps électrisé sur un autre qui ne l'est pas (*), ainsi que tout ce qui concerne les mouvements excités dans tous les corps par les attractions et répulsions électriques qui en sont la conséquence.

Lorsque deux disques de métal, possédant chacun une quantité égale d'électricité contraire, sont séparés par une couche d'air, ou un plateau de matière isolante, les deux électricités exercent l'une sur

(*) Voir à ce sujet, *Traité de l'électricité et du magnétisme*, t. II, p. 178 et suiv.

l'autre une action attractive; de sorte que leur action propre sur les corps environnants n'est plus sensible. On dit dans ce cas que les deux électricités sont dissimulées. Dans le cas où le corps isolant intermédiaire est peu résistant et que l'action attractive a assez de force pour vaincre la résistance opposée par le corps intermédiaire, ou seulement quelques-unes de ses parties, il s'opère une décharge qui peut être accompagnée de lumière. Cette propriété a servi à construire des appareils d'une grande utilité et qu'on trouve décrits dans tous les ouvrages de physique, et particulièrement dans le *traité de l'Électricité*, tome II, p. 217 et suiv. Nous citerons entre autres, 1° le condensateur, qui sert à accumuler et à rendre sensibles de très-petites quantités d'électricité; 2° l'électrophore ou porteur d'électricité; 3° les bouteilles de Leyde et les batteries, dont l'usage est tellement connu, que nous nons abstenons de décrire ces appareils. Il n'a été question encore que des propriétés physiques de l'électricité libre ou statique, mais cet agent se présente dans mille circonstances sous un autre état qui lui fait perdre ces propriétés, car il n'est plus saisissable comme auparavant : nous voulons parler de l'électricité dynamique ou en mouvement, dont nous avons le plus grand intérêt à connaître le mode d'action, soit comme force physique, soit comme force chimique.

Propriétés physiques de l'électricité dynamique.

L'électricité en mouvement constitue ce qu'on appelle un courant électrique, dont l'existence est constatée par son action sur l'aiguille aimantée. Voici le fait. Si l'on joint par un fil métallique les deux extrémités d'un appareil qui fournit sans interruption les deux électricités, et que l'on approche de ce fil une aiguille aimantée, librement suspendue, celle-ci s'agite, s'incline, et prend une direction dépendante de la position de ses pôles par rapport au fil conjonctif, suivant que l'un des pôles de l'aiguille regarde l'un ou l'autre pôle de l'appareil. Après un court examen, on reconnait dans le fil traversé par l'électricité une action révolutive autour de l'axe du fil; en effet, quand l'aiguille aimantée est placée au-dessus du fil tendu horizontalement, mais dans le plan du méridien magnétique, et que l'action de la pile est vive, l'aiguille se met à angle droit avec le fil; en plaçant l'aiguille au-dessous, la déviation est en sens inverse. En la mettant à droite ou à gauche, elle s'incline dans un sens ou dans un autre; si le courant chemine dans un autre sens, les effets sont inverses. On définit ainsi les directions du courant. Supposons un homme couché dans le sens de la longueur du fil conjonctif, les pieds du côté du pôle po-

sitif, la tête du côté du pôle négatif, de sorte que le courant aille des pieds à la tête, et que la face regarde l'aiguille; celle-ci est chassée dans un sens tel que le pôle austral est à la gauche de l'homme.

Le courant électrique agit en raison inverse de la simple distance, d'où l'on a conclu par le calcul que la force exercée par l'élément du fil agit en raison inverse du carré de la distance, comme l'attraction générale et les forces électriques. Passons à l'action des courants les uns sur les autres, suivant qu'ils sont dirigés dans le même sens ou dans des sens différents. Pour étudier cette action, il faut rendre mobiles des portions de circuit, au moyen d'appareils dont on trouvera la description tome III, p. 15 (*). On reconnaît alors que les courants dirigés en sens contraire se repoussent, et s'attirent quand ils vont dans le même sens; effets contraires à ceux qui ont lieu dans l'action à distance des corps électrisés différemment ou de la même manière. Au surplus, la loi qui régit ces actions peut être ainsi définie: Deux portions de courant s'attirent quand elles vont l'une et l'autre en s'approchant du sommet de l'angle, et se repoussent au contraire, quand l'une s'éloigne et l'autre se rapproche du sommet.

Considérons maintenant le cas des circuits fermés. Soit un conducteur de forme rectangulaire, disposé de manière à être mobile et soumis à l'action d'un courant indéfini dont la direction est perpendiculaire au plan du rectangle, tome III, p. 25. L'expérience démontre et l'analyse confirme que l'action du courant amène ce conducteur dans une position fixe d'équilibre, dans un plan parallèle au courant indéfini. Il en sera encore de même si, au lieu d'un circuit fermé, on prend un certain nombre de circuits situés dans des plans parallèles, et dont toutes les parties sont liées ensemble d'une manière invariable, comme cela arrive dans le cylindre électro-dynamique.

Voyons actuellement l'action des aimants sur des conducteurs pliés en hélices, ou sur des cylindres électro-dynamiques librement suspendus. Si l'on présente un barreau aimanté a un semblable cylindre, à une certaine distance, et hors de l'espace compris entre les deux plans des spires extrêmes, on trouve que les deux parties opposées du cylindre manifestent des actions contraires, c'est-à-dire des attractions et des répulsions, selon le sens du courant et la nature du pôle le plus voisin, effet absolument analogue à ceux que l'on observe quand on présente un aimant a un autre aimant.

Un cylindre électro-dynamique est donc en tout semblable à un

(*) *Traité de l'électricité et du magnétisme.*

barreau aimanté. Aussi, si on le suspend par son milieu à un axe vertical, dès l'instant qu'il est parcouru par un courant, il oscille pendant quelques instants et vient se placer dans le méridien magnétique.

Si l'on examine la direction des courants, on les trouve descendants à l'est et ascendants à l'ouest, allant de l'est à l'ouest dans la partie inférieure de chaque spire, et de l'ouest à l'est dans la partie supérieure.

C'est en raison de ces effets que M. Ampère a avancé et prouvé par le calcul, que l'on devait considérer un aimant comme un cylindre électro-dynamique, dans lequel les courants circulent de l'est à l'ouest, dans la partie inférieure de chaque spire, dont le plan est perpendiculaire à l'axe quand l'aimant est dirigé par l'action de la terre; ce rapprochement est important pour la théorie des aimants, et en particulier pour la théorie du magnétisme ; car on peut inférer de là, sans cependant que le fait soit prouvé, que le magnétisme du globe peut être représenté par l'action de courants électriques circulant de l'est à l'ouest dans la croûte superficielle. C'est une question sur laquelle nous reviendrons quand nous traiterons du magnétisme terrestre, dans ses rapports avec la physique du globe.

Diverses questions ont été résolues, à l'égard de l'action des courants et des aimants, entre autres celle qui concerne la rotation des courants par l'influence des courants, des aimants ou du magnétisme terrestre, et réciproquement la rotation des aimants par l'influence des courants; mais comme ces questions sont entièrement du domaine de la physique générale, nous renvoyons nos lecteurs à ce que nous en avons dit tome III, p. 35 (*). Avant de faire connaître les différentes causes qui provoquent le dégagement de l'électricité, nous devons décrire les appareils destinés à étudier ce dégagement dans toutes les circonstances où il a lieu.

(*) *Traité de l'électricité et du magnétisme.*

CHAPITRE II.

Des appareils destinés à étudier le dégagement de l'électricité.

Des électroscopes et des électromètres.

Les appareils employés pour constater la présence de l'électricité libre sur les corps, ont reçu le nom d'*électroscopes*, d'*électromètres*; les premiers accusent seulement la présence de l'électricité ; les seconds servent à mesurer son intensité.

Si le corps est assez fortement électrisé, il suffit de lui présenter des corps légers, ou mieux encore une petite balle de moelle de sureau suspendue à l'extrémité d'un fil de cocon. S'il y a attraction, puis répulsion de la balle de sureau, on est certain que le corps est électrisé. Si la tension de l'électricité est plus ou moins faible, il faut avoir recours à différents appareils décrits dans tous les ouvrages de physique, et dont je vais en peu de mots rappeler la description. Le premier appareil (pl. VI, fig. 1) est formé de deux brins de paille très-menus, suspendus parallèlement l'un à l'autre à deux petits anneaux de fil de métal fixés à une tige métallique terminée par un bouton arrondi, laquelle tige passe dans la tubulure d'une petite cloche à laquelle elle est assujettie au moyen d'un bouchon ou de gomme laque. Cet appareil peut être transporté sans inconvénient dans les voyages. Le deuxième se compose de deux fils de métal très-fins, terminés par deux petites balles de sureau, et suspendus comme les deux brins de paille. Le troisième se compose de deux lames d'or battu, très-minces, suspendues parallèlement l'une à l'autre, coïncidant dans toutes leurs parties, et dont une des extrémités est fixée dans une pince fixée également dans la tige métallique. Lorsque l'on communique à cette tige une petite quantité d'électricité, celle-ci est transmise aux feuilles d'or, qui s'écartent aussitôt en vertu de la répulsion qui a lieu entre deux corps chargés d'électricité de même nature. Cette répulsion est d'autant plus forte pour la même quantité d'électricité, que les bras de levier sont plus légers. La cloche qui les renferme doit avoir un diamètre suffisant, pour que, dans leur plus grand écartement, leurs extrémités ne viennent pas tou-

cher les parois. Le quatrième électroscope (pl. VI, fig. 2) a une plus grande sensibilité que les précédents. Il se compose d'un fil de cocon dédoublé dont l'un des bouts est fixé dans les branches d'une pince, et dont l'autre porte un petit fil horizontal en gomme laque, à l'une des extrémités duquel est attaché un petit disque de clinquant; pour maintenir l'horizontalité, on établit à l'autre extrémité un contre-poids. La pince est fixée dans une pièce mobile, que l'on tourne quand on veut donner à l'aiguille une position déterminée. La tige mobile est fixée au centre d'un disque de verre qui recouvre la cloche où se trouvent le fil de cocon et le disque de clinquant. On pratique dans le couvercle une échanerure pour introduire le corps soumis à l'expérience. L'intérieur de la cloche est desséché avec du chlorure de calcium ou de la chaux vive. Lorsqu'on veut se servir de cet appareil, on électrise le disque de clinquant, en lui communiquant l'une des deux électricités; puis on lui présente à distance le corps que l'on suppose électrisé, et l'on juge de son état par l'attraction, la répulsion ou l'état de repos du disque. Ces quatre appareils peuvent être construits sans l'intervention des ingénieurs en instruments.

Le cinquième appareil (pl. VI, fig. 3) est d'une sensibilité beaucoup plus grande que le précédent. Voici sa construction : on prend deux pile sèches que l'on pose verticalement par leur pôle de nom contraire AA' sur un plateau métallique. Ces deux piles peuvent être éloignées ou approchées à volonté au moyen de deux vis de rappel *vv'*, et sont recouvertes d'une cloche *v* munie d'une tubulure dans laquelle passe une tige, à l'extrémité inférieure de laquelle est fixée une feuille d'or, comme celle du troisième appareil, et qui se trouve placée entre les deux pôles. Quand cette feuille est à l'état neutre, elle reste en équilibre; mais vient-on à communiquer à la tige une des deux électricités, aussitôt la feuille est attirée par le pôle qui possède l'électricité contraire, et repoussée par l'autre. Cet appareil a une telle sensibilité, que lorsque les deux piles fonctionnent convenablement, un bâton de gomme laque, frotté avec du drap, agit sur la feuille, dans un temps sec, à une distance de deux à trois mètres. Le sixième appareil, fig. 4, a l'avantage de donner des résultats comparables. Il est dû à M. Rousseau. M. Peltier y a fait des perfectionnements qui en rendent l'emploi facile. Cet appareil se compose d'un socle sur lequel est collé un cadran en carton divisé. A cinq centimètres du centre se trouve l'extrémité d'une tige de cuivre légèrement arquée arrivant au zéro, et repliée ensuite presque à angle droit, puis pénétrant dans le socle dont elle est isolée au moyen de résine, comme

on le voit en C D. L'extrémité D est destinée à recevoir des plateaux condensateurs ou tout autre appareil. A l'extrémité intérieure de la tige est soudée une petite plaque d'acier polie et tant soit peu concave, et dans laquelle on place le pivot d'une aiguille aimantée OE, maintenue en équilibre au moyen d'un contre-poids *p* en gomme laque. Pour donner une grande sensibilité à cet appareil, l'aiguille doit être formée d'un fil de cuivre très-fin, au centre de gravité duquel est soudé un pivot d'acier trempé, terminé par une pointe excessivement fine. Pour lui donner une direction fixe, on place au centre sur ce pivot un très-petit fil d'acier trempé très-faiblement aimanté. La quantité de magnétisme qu'on lui donne est précisément celle qui est nécessaire pour ramener l'aiguille en contact avec la tige horizontale. L'aiguille mobile ne doit pas être en acier, si l'on veut avoir le maximum de sensibilité. Le socle est placé lui-même sur un second socle muni à son centre d'une tige en cuivre servant de pivot. Ce second socle porte également un cadran divisé, dont l'index est fixé sous le zéro du premier cadran. A la tige formant pivot s'adapte à volonté, au-dessus du cadran, une lame en cuivre de la longueur de l'aiguille mobile, et placée à sa hauteur. A l'extrémité inférieure du pivot est vissé un levier horizontal au-dessous des socles, au moyen duquel on manœuvre la lame intérieure. En l'approchant aussi près que l'on veut de l'aiguille indicatrice, on augmente à volonté la sensibilité. Le tout est entouré d'un cylindre de verre recouvert avec un plateau de verre sur lequel se trouve un cercle divisé, afin que le rayon visuel passant par les deux mêmes degrés, ne puisse causer des effets de parallaxe. Pour observer de fortes tensions, il faut que l'aiguille aimantée ait des dimensions convenables pour recevoir un magnétisme nécessaire à une force directrice capable de résister plus ou moins à la force que l'on mesure; l'appareil est placé de telle manière que l'aiguille mobile, quand elle touche légèrement la tige, se trouve dans le méridien magnétique. Quand on veut opérer, on touche le bouton D avec le corps électrisé, et aussitôt l'aiguille s'écarte de la tige d'un certain nombre de degrés. Plus les armatures sont rapprochées, plus la déviation est grande. Cet appareil donne des résultats comparables et sert de balance de torsion en suspendant à un fil de métal l'aiguille mise en relation avec un liquide contenu dans la chappe.

Tous ces appareils n'accusent la présence de l'électricité qu'autant que sa tension est suffisante; mais comme la plupart du temps elle est très-faible, on emploie un condensateur, composé de deux plateaux dits *condensateurs*, en laiton, dressés au tour, afin que

leurs surfaces coïncident le mieux possible. Ils sont dorés, puis recouverts d'une couche mince de vernis à la gomme laque, appliquée à chaud. L'un des plateaux est vissé à la tige de métal (pl. VI, fig. 3), à la place du bouton. Le plateau supérieur porte à son centre un manche isolant qui sert à le manœuvrer. Le plateau inférieur est nommé *collecteur*, parce qu'il reçoit l'électricité de la source d'où elle émane On enlève le vernis sur une petite étendue de la surface extérieure de chaque plateau, afin de pouvoir faire communiquer directement le plateau inférieur avec la source d'électricité et le plateau supérieur avec le réservoir commun, au moyen du doigt. Au lieu de plateaux en cuivre doré, il vaut mieux employer des plateaux de verre doré, attendu, d'une part, que l'on dresse bien mieux le verre que le métal, et que, de l'autre, on est certain qu'en touchant l'une des surfaces avec un corps humecté par un acide, ce dernier ne peut réagir sur le laiton, à travers les parties qui n'auraient pas été dorées complétement. Le diamètre des plateaux varie d'un à deux décimètres.

L'électroscope condensateur doit se placer dans une cage vitrée, desséchée avec du chlorure de calcium ou de la chaux vive, et dont l'étendue soit suffisante pour que l'on puisse expérimenter sans difficulté et y placer les objets nécessaires aux expériences. Pour se servir de cet appareil très-sensible, il suffit de mettre en communication le plateau inférieur avec la source qui fournit l'électricité, et de toucher le plateau supérieur avec le doigt mouillé; l'électricité qui arrive ne pouvant traverser la couche de vernis, décompose l'électricité naturelle du plateau supérieur, attire celle de nom contraire, et repousse l'autre. Ces actions continuent jusqu'à ce que la tension de l'électricité de la source soit égale à celle de l'électricité libre non dissimulée sur le plateau supérieur, et qui est nécessaire pour compenser la distance qui sépare les deux faces métalliques. En enlevant le plateau supérieur, on rend libre, sur le plateau inférieur, l'électricité qui y était dissimulée, et son action se manifeste aussitôt sur l'électroscope; si les doigts sont secs, il faut les mouiller, sans quoi la condensation ne pourrait s'opérer. Dans les effets produits, il faut tenir compte de la réaction de l'eau dont sont imprégnés les doigts sur les liquides qui suintent par les pores de la peau; car cette réaction est une cause assez forte de dégagement d'électricité.

Du multiplicateur électrique ou galvanomètre.

Les appareils précédents servent à constater la présence de l'électricité libre sur un corps; mais si l'électricité est en mouvement, il

faut employer d'autres appareils appelés *multiplicateurs* ou *galvanomètres*, dont la construction repose sur la propriété que possède un courant électrique de réagir sur une aiguille aimantée d'une manière révolutive. Supposons que l'aiguille étant placée au-dessus d'un fil de cuivre, on plie ce dernier de manière à le faire revenir au-dessus, elle éprouvera de chacune des circonvolutions une action qui tendra à la diriger dans le même sens; de sorte que l'impulsion reçue sera double de celle qui aurait été produite par le fil simple; les parties latérales du fil exerceront la même action. En continuant à replier le fil sur lui-même, on multipliera l'action du courant sur l'aiguille aimantée. Le fil est entouré de soie pour empêcher la communication directe de l'électricité d'une circonvolution à l'autre, et enroulé autour d'un châssis en laiton; dans l'intérieur de ce châssis est suspendue une aiguille aimantée à un fil de cocon. La construction du multiplicateur varie suivant la source qui fournit l'électricité : tantôt il est à fil court et d'un certain diamètre, tantôt le fil est très-long et d'un petit diamètre. Le multiplicateur à fil court sert pour reconnaître l'électricité dégagée par la chaleur; le second, à fil long, pour l'électricité ayant une origine chimique. Quand l'aiguille aimantée est dérangée de sa position d'équilibre naturelle par l'action d'un courant, elle tend à revenir dans le plan du méridien magnétique, en vertu de l'action de la terre; action que l'on neutralise en grande partie, en plaçant une seconde aiguille aimantée, aussi semblable que possible à la première, sous le rapport de la forme et de l'aimantation, dans une direction parallèle, les pôles inverses en regard, et fixées l'une et l'autre à une tige légère de métal : une des aiguilles est placée dans l'intérieur du châssis, l'autre à l'extérieur. Ce système est suspendu à un fil simple de cocon, et on ne lui laisse que la force directrice nécessaire pour que la durée d'une oscillation soit au moins d'une minute.

La fig. 5, pl. V, représente un appareil complet. ABC est le châssis enveloppé par le fil de cuivre, dont les bouts aboutissent au tube métallique FF'. Ce châssis est fixé sur un plateau horizontal DE qui peut tourner dans son plan et autour de son centre au moyen d'une roue dentée à pignon placée en dessous, et mise en mouvement par le bouton G. HMN est le support du système astatique des deux aiguilles aimantées suspendues à un fil de cocon VL; RS est le cylindre de verre qui enveloppe l'appareil et repose sur la base KL. La fig. 6 représente la coupe de cet appareil suivant un plan qui passe par le fil et l'un des tubes de communication. Le cadran placé sur le châssis est percé à la partie centrale d'une petite ouverture cir-

culaire et d'une fente transversale, afin de pouvoir placer et retirer l'aiguille à volonté; les trois vis v,v',v'' servent à centrer l'aiguille. *tt* sont deux cônes creux en cuivre où viennent aboutir les deux extrémités du fil du multiplicateur, et dans lesquels on place les deux conducteurs qui transmettent l'électricité. Quand on veut transporter le multiplicateur, il faut commencer par abaisser les aiguilles jusqu'à ce que celle de dessus vienne se poser sur le cadran; puis on dévisse l'écrou *q*, on retire la cloche, et après avoir mis sur une des moitiés de l'aiguille servant d'index un large ruban de soie, de manière que les deux bouts en ressortent par les bords du cercle métallique *yz*, on remet en place la cloche et l'écrou; alors le fil de cocon ne soutenant plus aucun poids, et les aiguilles étant presque immobiles, en raison de la pression du ruban, on peut faire parcourir à l'appareil de grandes distances, sans crainte qu'il ne soit dérangé (*). L'appareil ne peut servir qu'autant que l'on a formé la table des intensités qui donne le rapport entre la déviation de l'aiguille aimantée et l'intensité du courant qui l'a produite. Voir à cet effet les méthodes employées pour former cette table, tome II de l'ouvrage cité ci-dessus, page 20 et suivantes.

Il existe encore un autre galvanomètre qui ne diffère du précédent qu'en ce qu'il est formé de deux fils de même diamètre, de même longueur, enroulés de soie de la même manière autour de la caisse de l'appareil. Lorsque ces deux fils sont parcourus par deux courants égaux dirigés en sens contraire, l'aiguille aimantée reste dans sa position d'équilibre ordinaire; mais pour peu qu'il y ait une différence entre les intensités, la déviation indique quelle en est la mesure. On conçoit très-bien qu'avec ce multiplicateur, connu sous le nom de *multiplicateur à deux fils*, on puisse facilement former la table des intensités. En effet, supposons qu'on fasse passer dans un des fils un courant d'une certaine intensité, l'aiguille aimantée sera déviée. On tiendra note de la déviation; on fera passer ensuite simultanément un courant de même intensité dans le second fil, et on aura une autre déviation correspondante à une intensité double. En variant l'intensité du courant, on obtiendra un nombre plus ou moins considérable de résultats qui, d'un côté, donneront les déviations de l'aiguille, de l'autre, les intensités correspondantes. Ensuite, par la méthode des interpolations, on établira la table des

(*) Pour plus ample description, voyez *Traité de l'électricité*, t. III, p. 425 et suiv.

intensités qui, bien entendu, doit être faite pour chaque appareil, attendu que les rapports entre les déviations et les intensités du courant dépendent de l'intensité de celui-ci, de la construction de l'appareils, de l'aimantation des aiguilles. Quand on veut observer des courants produits par des décharges instantanées, comme celles obtenues avec la bouteille de Leyde ou les poissons électriques, il faut que le fil de cuivre recouvert de soie soit enduit de vernis à la gomme laque sur toute sa longueur, afin que les circonvolutions soient aussi bien isolées que possible; sans cela, la décharge pourrait passer d'une circonvolution à une autre. Il arrive fréquemmment que lorsqu'on cherche à rendre suffisamment astatique le système des deux aiguilles, on n'y parvient qu'avec peine. On peut employer la méthode suivante pour remédier à cet inconvénient :

M. Melloni ayant operé avec un galvanomètre dont le système astatique avait une telle sensibilité qu'il se mettait dans une direction perpendiculaire au fil par l'action du plus faible courant, pour remédier à cet inconvénient, il plaça un barreau aimanté horizontal dans le plan des deux aigu lles, et précisément dans la direction de la ligne intermédiaire; il se trouvait donc également éloigné des deux pôles conjugués; le systeme astatique conserva son état d'équilibre. Mais si le barreau aimanté, toujours dans le plan des aiguilles, était porté au-dessus ou au-dessous de la ligne intermédiaire, les oscillations devenaient plus rapides; or, comme on pouvait changer la position du barreau avec une lenteur extrême, on parvenait à donner au système la sensibilité voulue. Ce principe sert aussi à obtenir la compensation d'une couple d'aiguilles à force magnétique très-inegale. M. Melloni a reconnu, en effet, qu'il est possible de modérer l'action trop vive et pour ainsi dire indéfinie; car en prenant un barreau suffisamment énergique et en le plaçant très-près des aiguilles, on pousse l'opération aussi loin que possible; mais le perfectionnement a une limite dépendant du degré de compensation stable que possèdent les systèmes. La méthode que l'on vient d'exposer ne peut être appliquée au galvanomètre à une seule aiguille. La compensation obtenue au moyen du barreau arrivant à un certain degré, l'index ne tient plus le zéro, et l'aiguille prend alors diverses positions d'équilibre où elle reste, bien que l'on fasse tourner le châssis d'un certain nombre de degrés; dans ce cas, les centres d'attraction latente qui existent dans le fil de métal deviennent sensibles. Il est commode de donner au barreau compensateur 2 décimètres environ de longueur et 5 ou 6 millimètres de diamètre. M. Melloni fait usage de ce procédé dans des

expériences relatives à la chaleur rayonnante, et il pense que dans cette circonstance, le thermo-multiplicateur doit être préféré à toute autre espèce d'instruments thermoscopiques, en raison de la sensibilité, de la promptitude et de la netteté des indications; mais il ne conseille pas d'employer constamment le thermo-multiplicateur porté à son plus haut degré de délicatesse. Bien au contraire, l'excès de sensibilité est nuisible, attendu que le temps nécessaire aux aiguilles pour retourner au zéro, lorsqu'on supprime l'action de la chaleur sur la pile thermo-électrique, augmente avec la sensibilité astatique du système. Dans ce cas, si l'on a un galvanomètre trop sensible, il devient avantageux de se débarrasser du surplus de la sensibilité qui retarderait en pure perte la marche des démonstrations expérimentales, et qui les rendrait souvent moins concluantes.

M. Rumkorff a adopté une autre disposition. Il prend deux petits barreaux aimantés de 8 centimètres environ de longueur, mobiles autour d'un axe situé au centre d'un arc de cercle divisé, les pôles de nom contraire en regard; de sorte que lorsque les deux barreaux sont verticaux, leur action est nulle à quelque distance pour les points situés au-dessous. On place ce petit appareil au-dessus du multiplicateur, sur le plateau de verre qui le termine, de telle façon que les barreaux étant verticaux, leur ligne de jonction coïncide avec l'axe de suspension et que leur plan coïncide immédiatement avec celui des aiguilles. On s'arrange pour que les pôles des petits barreaux aimantés soient en regard des pôles de nom contraire, ou, suivant les cas, de même nom, de l'aiguille supérieure. En donnant plus ou moins d'écartement aux barreaux, on augmente plus ou moins la sensibilité de l'appareil.

Le multiplicateur qui sert à reconnaître les courants électro-chimiques est à fil long, c'est-à-dire que le nombre des circonvolutions du fil est de plusieurs mille. Ce nombre ne doit être que de vingt à quarante pour les multiplicateurs thermo-électriques; dans ce cas, le fil a un plus gros diamètre que l'autre. Il est indispensable d'avoir à sa disposition des appareils propres à comparer des courants d'une certaine intensité. A cet effet, on emploie deux espèces de boussoles; l'une, dite *boussole des tangentes*; l'autre, *boussole des sinus*, qui, pour la première fois, a été décrite par M. de la Rive. La première est employée, par M. Pouillet, à mesurer des courants très-énergiques; la seconde, des courants moins intenses.

La boussole des tangentes (fig. 7, pl. VI) se compose d'un grand cercle de 4 à 5 décimètres de diamètre, formé par un ruban de

cuivre de 5 millimètres de largeur et de 2 millimètres d'épaisseur; ce ruban est revêtu de soie, et ses extrémités, repliées convenablement, viennent plonger chacune dans un godet contenant du mercure. Le cercle du courant est disposé verticalement sur un autre cercle divisé horizontal que parcourt une aiguille de boussole suspendue à un assemblage de fils de soie sans torsion dans l'intérieur d'une cloche. Le centre de l'aiguille est le même que celui du cercle du courant, quand la longueur de l'aiguille est petite par rapport au rayon du cercle; l'intensité du courant est mesurée par la tangente de la déviation.

La boussole des sinus, fig. 8, se compose d'un rectangle formé par un ruban de cuivre rouge dans l'intérieur, vers le milieu duquel se trouve une aiguille aimantée à chappe d'agate qui se meut sur un pivot d'acier très-fin. Ce rectangle est placé sur une alidade qui se meut sur un cercle divisé, de telle sorte que le pivot de l'aiguille se trouve toujours dans l'axe de rotation. Les deux extrémités du ruban sont disposées de manière à être mises en communication avec la source d'électricité. Le rectangle doit être placé dans le méridien magnétique; quand l'aiguille aimantée est déviée d'un certain nombre de degrés, on fait mouvoir le rectangle de manière à le ramener dans le plan vertical de l'aiguille. Dans ce cas, l'intensité du courant est proportionnelle au sinus de la déviation. Nous avons maintenant tous les moyens dont la physique peut disposer pour étudier complétement le dégagement de l'électricité dans toutes les circonstances où il peut s'opérer.

CHAPITRE III.

Du dégagement de l'électricité dans les actions mécaniques.

Des effets électriques produits dans le clivage et la pression.

Le but que l'on se propose dans les expériences relatives au dégagement de l'électricité est de rechercher toutes les causes en vertu desquelles l'état d'équilibre des deux électricités est troublé dans les corps. Cette question se rattache à l'étude des phénomènes molécucaires, comme nous aurons l'occasion de le montrer. Dès lors sa

solution est de première importance pour les sciences physico-chimiques. Dans le dégagement de l'électricité, la quantité obtenue de chacun des deux fluides est d'autant plus considérable qu'on a pris plus de précaution pour s'opposer à leur recomposition au contact; conséquemment plus les corps d'où s'échappent les deux électricités sont meilleurs conducteurs, plus il faut créer d'obstacles pour éviter la recomposition. C'est en cela que consiste l'art de l'expérimentateur, et, malgré les efforts faits depuis vingt ans pour le perfectionner, on ne peut encore recueillir qu'une très-faible portion des deux électricités devenues libres à l'instant où leur équilibre est rompu. On peut dès à présent poser en principe, quel que soit le mode d'action employé, que lorsque la décomposition du fluide naturel se fait plus rapidement que la recomposition, la tension des deux fluides dégagés augmente jusqu'à ce qu'il y ait équilibre entre la décomposition et la recomposition.

A part le but scientifique qu'on se propose quand on étudie le dégagement de l'électricité, il en est un autre très-important qu'on ne doit pas perdre également de vue. En effet, le fluide électrique étant un agent extrêmement énergique, non-seulement comme puissance chimique, mais encore comme puissance mécanique, on doit s'attacher à rechercher les moyens les plus efficaces d'en recueillir la plus grande quantité. Cette question est du même ordre que celle qui concerne la production et l'emploi de la chaleur dans les arts; car on cherche les combustibles les meilleurs et les plus économiques, ainsi que les procédés les moins dispendieux pour recueillir la plus grande portion de chaleur dégagée dans l'acte de la combustion. Tel est le point de vue sous lequel nous envisageons depuis longtemps la question du dégagement de l'électricité.

Jadis, on considérait le dégagement de l'électricité comme un phénomène isolé ne se rattachant à aucun autre, et mettant seulement en évidence une propriété de la matière. Fabroni, et après lui Davy, sont les premiers qui aient essayé de démontrer que ce dégagement avait des rapports avec les affinités qui se manifestent dans le contact des corps. Depuis lors, le dégagement de l'électricité a été étudié, particulièrement dans ses rapports avec les actions chimiques; il en est résulté que l'on a reconnu la présence de l'électricité dans une foule de circonstances où on ne la soupçonnait pas même jadis. Quiconque veut aujourd'hui créer une théorie électro-chimique doit commencer par faire une étude approfondie des phénomènes relatifs au dégagement de l'électricité, surtout dans les actions chimi-

ques, si l'on ne veut courir la chance de l'établir sur des bases peu stables.

Lorsqu'une substance quelconque, un sel, par exemple, est dissous dans un liquide, si ce dernier est enlevé peu à peu, les molécules, à mesure qu'elles se rapprochent, sont soumises davantage à la force d'agrégation, c'est-à-dire à la force qui s'exerce entre les molécules similaires; mais bien que les molécules soient semblables, il n'est pas dit pour cela que chacune d'elles soit identique dans toutes ses parties; car si cela était, on ne voit pas comment la force d'agrégation pourrait s'exercer entre des parties douées de facultés absolument semblables. On est donc conduit à admettre que chaque molécule possède au moins deux faces douées de propriétés différentes, et que la réunion de deux molécules contiguës doit se faire suivant deux faces non semblables. Voyons actuellement si, en séparant deux molécules contiguës, semblablement placées, on ne produirait pas des effets électriques capables de nous éclairer sur l'intervention de l'électricité dans l'attraction moléculaire. Pour cela, nous allons examiner successivement ce qui se passe dans le clivage, la pression et la séparation rapide de deux disques de verre que l'on fait adhérer ensemble.

Lorsque l'on clive rapidement une lame de mica dans l'obscurité, on aperçoit toujours une faible lueur phosphorique dont la cause a été un mystère jusqu'à ce qu'on ait fait l'expérience en fixant une tige isolante à chacune des faces opposées de cette lame, afin de pouvoir les séparer et les présenter à un électroscope. On trouve alors que chacune des faces séparées possède un excès d'électricité contraire, dont l'intensité est d'autant plus grande que la séparation a été plus rapide. Ce phénomène ayant toujours lieu, quelque mince que soit la lame de mica, on peut en conclure qu'il se reproduirait encore à la limite, c'est-à-dire, s'il était possible de séparer l'une de l'autre deux molécules. Ces faits prouvent deux choses :

1° Que les molécules possèdent au moins deux faces douées de facultés différentes; car, sans cela, on ne voit pas pourquoi une des lames donne une électricité et l'autre lame l'électricité contraire; 2° que chacune de ces faces manifeste une polarité électrique à l'instant où l'on détruit la force d'agrégation. Les actions chimiques, comme nous le prouverons, conduisent aux mêmes conséquences.

Le mica n'est pas la seule substance qui possède la propriété électrique de clivage, nous la retrouvons dans le talc feuilleté du Saint-Gothard, ainsi que dans toutes les substances cristallisées rangées

parmi les corps mauvais ou médiocres conducteurs. On peut donc poser en principe que toutes les fois que l'on sépare deux molécules en contact, chacune d'elles emporte un excès d'électricité contraire, pourvu toutefois que les corps auxquels elles appartiennent ne soient pas tellement bons conducteurs que la recomposition des deux électricités devenues libres suive immédiatement leur séparation.

Pour réussir dans ces expériences, il faut enlever aux cristaux la couche d'eau hygrométrique qui adhère ordinairement à leur surface, et porter rapidement les parties séparées dans l'électroscope de Coulomb.

Deux lames de mica détachées du même cristal, rapprochées l'une de l'autre et légèrement pressées jusqu'à les faire adhérer, sortent de la compression chacune avec l'état électrique qu'elle possédait à l'instant du clivage. L'effet est particulièrement marqué quand on élève légèrement la température de celle des lames qui possédait l'état négatif en sortant du clivage.

Il est facile d'expliquer maintenant pourquoi l'on ne peut recueillir d'électricité libre quand on broie, dans un mortier d'agate, des cristaux de substances conduisant mal l'électricité, car il y a recomposition immédiate des deux électricités contraires dégagées sur deux lamelles contiguës. C'est par le même motif que l'on n'obtient aucun effet électrique lorsque l'on brise des corps cristallisés irrégulièrement ou formés de parties groupées confusément, comme des tubes de verre, des bâtons de gomme laque, etc., etc. On conçoit de même pourquoi l'on n'observe aucun signe d'électricité libre dans le clivage d'un cristal conducteur de l'électricité, comme la galène, les pyrites et autres, attendu que la vitesse de séparation ne peut jamais être assez grande pour empêcher la recomposition des deux électricités à l'instant où elles se séparent. A défaut d'électricité libre, on pourrait constater la présence de cet agent au moyen des effets électriques de mouvement : à cet effet, le cristal devrait être mis en communication par deux points avec les bouts du fil d'un galvanomètre. Il est infiniment probable qu'en clivant rapidement le cristal, les deux électricités provenant de la destruction de l'attraction moléculaire en suivant le fil, pour se recombiner, produiraient un courant qui réagirait sur l'aiguille aimantée.

Passons aux effets électriques produits lors de la destruction de l'attraction moléculaire entre deux substances hétérogènes. Si l'on verse dans un verre conique, préalablement chauffé, du soufre en fusion, et que l'on plonge dedans avant qu'il soit refroidi un tube de

verre, pour retirer le soufre du verre, on trouve, après la solidificatiou, que, lorsque l'on enlève le cône de soufre, le verre possède un excès d'électricité négative, et le soufre un excès d'électricité contraire. Le chocolat, l'acide phosphorique, après leur solidification dans un verre, donnent des effets semblables, ainsi que le proto-chlorure de mercure lorsque, l'ayant fait sublimer dans le col d'un matras, on en sépare rapidement quelques portions avec un tube isolant, à l'extrémité duquel se trouve un peu de cire molle. Nul doute que, dans ces expériences, l'effet ne provienne de la destruction de l'attraction exercée par les molécules des deux surfaces qui adhèrent l'une à l'autre. On est porté à croire que, lorsque le soufre s'attache au verre, il y a également production d'effets électriques que l'on ne peut reconnaître à l'aide de l'expérience, mais qui doivent être en sens inverse des précédents.

Nous sommes conduit naturellement à parler du dégagement d'électricité par pression, c'est-à-dire, des effets électriques qui ont lieu quand on presse deux corps l'un contre l'autre jusqu'au point de les faire quelquefois adhérer.

Libes est le premier qui ait observé qu'en posant sur un disque de bois recouvert de taffetas enduit d'une couche de résine élastique, un disque de laiton fixé à un manche de verre, avec la précaution de ne lui faire éprouver aucun frottement, si l'on presse légèrement le taffetas gommé, le disque de métal prend un excès assez considérable d'électricité négative : les effets sont inverses en pressant avec frottement; des disques d'argent, de zinc, etc., ont donné des effets semblables. Cette différence entre les effets de pression et ceux de frottement est des plus remarquables, et n'a pu être expliquée jusqu'ici.

Plus tard, Haüy trouva qu'un cristal de spath d'Islande et quelques autres substances minérales jouissent de la propriété de devenir électriques par la simple pression des doigts ; mais cette propriété n'est pas aussi restreinte qu'il le pensait, car elle appartient à tous les corps, même à ceux qui sont conducteurs, pourvu qu'ils soient isolés. Pour mettre le fait en évidence, on forme, avec les substances que l'on veut essayer, des petits disques d'une épaisseur de quelques millimètres que l'on adapte à des manches parfaitement isolants; on prend un manche dans chaque main, et l'on presse les disques l'un contre l'autre ; après les avoir retirés du contact, on les présente au disque de clinquant de l'électroscope de Coulomb préalablement électrisé ; on trouve alors que les deux corps possèdent chacun

une électricité contraire, pourvu toutefois que le corps soit mauvais conducteur : le liége et le caoutchouc, pressés l'un contre l'autre, donnent, le premier l'électricité positive, le second l'électricité négative.

Les substances minérales cristallisées ayant un aspect vitreux, telles que la chaux sulfatée, la chaux fluatée, la baryte sulfatée, prennent l'électricité positive quand elles sont pressées avec le disque de liége. Des fruits, tels que l'orange, comprimés par un disque de même nature, lui communiquent, au contraire, un excès d'électricité positive; à mesure que le fruit se dessèche et perd de son élasticité, la faculté de s'électriser diminue. Plusieurs causes tendent à modifier le dégagement de l'électricité par pression : la première est le plus ou moins de conductibilité des corps. Si l'on emploie, par exemple, un disque de moelle de sureau et un disque de métal, il n'y a aucun effet produit, et il en est encore de même toutes les fois que des substances pressées sont conductrices de l'électricité. Il paraît qu'à l'instant où l'on exerce la pression, il se forme un nouvel état d'équilibre entre les deux fluides qui composent le fluide naturel des molécules en contact : tant que dure la pression, ces deux fluides sont neutralisés l'un par l'autre; ainsi, malgré leur attraction réciproque, leur tendance à passer d'un corps dans l'autre, ils trouvent dans la pression une force qui neutralise ces deux actions. Quand les corps sont bons conducteurs, dès l'instant qu'une diminution de pression a lieu, les deux fluides se recombinent instantanément, quelle que soit la vitesse de séparation, tandis que, lorsque l'un d'eux n'est pas bon conducteur, une diminution de pression n'entraîne pas immédiatement la recomposition des deux électricités, laquelle met plus ou moins de temps à s'effectuer, suivant le degré de conductibilité des deux corps pressés. L'expérience suivante met en évidence l'influence de la vitesse de séparation dans les effets électriques de pression :

Pressez un disque de liége sur une orange, et retirez-le ensuite vivement, il emporte avec lui un excès d'électricité positive assez considérable; mais si on ne le retire que lentement, on trouve que cet excès va en diminuant; et si la vitesse de séparation est très-lente, elle devient à peine sensible.

La chaleur modifie les phénomènes de pression. Si l'on prend un bouchon de liége bien sec, et qu'on le coupe par la moitié avec un instrument tranchant, en pressant les deux parties séparées l'une contre l'autre, assez ordinairement elles prennent chacune un excès d'é-

lectricité contraire; mais il arrive souvent aussi qu'elles ne sont pas électrisées. Si l'on élève de quelques degrés la température de l'un des deux disques, celle de l'autre restant constante, on trouve que la partie chauffée prend a l'autre l'électricité négative. Deux morceaux de spath d'Islande, à la même température, ne sont pas électriques par pression; mais il suffit d'une différence très-légère pour leur donner cette faculté. A température égale, les deux disques de liége ne doivent leurs facultés électriques de pression qu'à une différence dans l'état de leur surface : celle qui a le plus d'aspérités prend toujours à l'autre l'électricité négative. L'état des surfaces dans les corps mauvais conducteurs influe aussi sur leur qualité conductrice, car le spath d'Islande, qui est rangé parmi les corps les plus mauvais conducteurs (puisqu'il conserve pendant des semaines entières l'électricité qu'on lui a communiquée), devient suffisamment bon conducteur quand on lui a enlevé son poli, pour qu'il soit nécessaire de l'isoler si l'on veut qu'il conserve son électricité. Les aspérités déterminent donc non-seulement l'espèce d'électricité que doit prendre un corps mauvais conducteur, mais elles modifient encore son pouvoir conducteur.

Pour mesurer les effets électriques de pression, il faut un appareil qui permette à volonté de varier les causes qui influent sur leur production (*). L'expérience prouve que les intensités électriques croissent proportionnellement aux pressions, pour des pressions qui ne dépassent pas 10 kilogrammes. Cette loi s'étend-elle à des pressions plus élevées? Il est difficile de répondre à cette question. M. Péclet a entrepris à cet égard quelques recherches, en vue particulièrement de déterminer l'influence de la pression, de la vitesse, etc., sur le dégagement de l'électricité dans le frottement; mais les résultats qu'il a obtenus ne peuvent être appliqués en rien au cas actuel; nous en parlerons, au surplus, en traitant des effets électriques de frottement. Nous ferons seulement remarquer qu'il est probable que la quantité d'électricité que prend chaque corps pendant qu'on le comprime est dépendante du degré de l'attraction que les molécules des surfaces exercent les unes sur les autres; mais comme on ne peut apprécier les rapports existant entre l'attraction et la pression, ou le rapprochement plus ou moins grand des molécules, il est impossible de déterminer les rapports entre les quantités d'électricité correspondantes. La difficulté de séparer instantanément les deux corps com-

(*) Voyez *Traité de l'électricité et du magnétisme*, t. II, p. 100.

primés, sans passer par des pressions intermédiaires, successives, rend pour ainsi dire impossible la détermination des rapports en question.

On serait peut-être porté à croire que la chaleur dégagée dans la pression est la cause du dégagement de l'électricité; l'expérience suivante prouve le contraire, en même temps qu'elle montre l'influence du rapprochement des molécules pour augmenter le dégagement de l'électricité quand on vient à séparer les corps. Deux corps se trouvant sous l'action d'une certaine pression, si l'on vient à diminuer celle-ci de moitié, l'effet de la pression perdue subsiste pendant un temps dont la durée dépend du degré de conductibilité; de sorte que si l'on retire immédiatement ces corps de la compression, chacun d'eux emporte avec lui un excès d'électricité contraire, plus grand que celui qui est dû à la pression restante. Maintenant, au lieu de séparer les corps lorsque la pression a été diminuée, on rend celle qui a été enlevée, et l'on répète plusieurs fois ce mode d'action. Une lame de spath d'Irlande et un disque très-mince de liége ont donné par exemple les résultats suivants. Ces deux corps étant d'abord sous la pression de 4 kilogrammes, on a réduit celle-ci de moitié sans déranger le contact; et une minute après on les a séparés. La tension électrique de chaque disque était représentée par 170; si la séparation eût eu lieu pendant la pression de 4 kilogrammes, la tension aurait été de 250, et pendant la pression de 2 kilogrammes, de 125, moitié de la précédente : on voit donc que, dans le premier cas, l'effet produit par la pression qui a été perdue subsiste encore en partie. Au lieu de séparer les corps, quand on a réduit la pression de 4 à 2, on leur rend la pression qui a été enlevée, et l'on répète plusieurs fois ce jeu alternatif de pression simple et de pression double. On trouve, en définitive, que le disque de liége ne possède jamais plus que l'intensité 250, relative à la pression la plus forte.

En considérant la manière dont le dégagement de l'électricité croît dans les corps par l'augmentation de la pression, ne peut-on pas y rapporter certains phénomènes lumineux dont on ne connaît pas encore bien l'origine? On dit, par exemple, que dans les mers polaires il arrive souvent que des blocs de glace, en se heurtant, font jaillir la lumière. Ces blocs énormes arrivent à la rencontre les uns des autres avec des quantités de mouvement considérables; leurs parties constituantes doivent donc éprouver une compression énorme qui les constitue dans un état électrique différent; mais aussitôt que la compression a cessé, les deux électricités se recombinent ensemble

pour former du fluide neutre, et il en résulte une lumière plus ou moins vive, selon la tension de l'électricité dégagée.

Du dégagement de l'électricité par frottement.

Pour bien étudier les effets du dégagement de l'électricité par frottement, nous commencerons par les métaux dans lesquels ces effets ne sont pas aussi variables que dans les corps mauvais conducteurs, lorsqu'il existe de légères différences dans l'état de leur surface.

Si l'on soude à chacun des bouts du fil d'un multiplicateur à fil court une plaque de métal différent, que l'on passe chaque bout dans un bouchon de liége évidé, de manière à pouvoir enchâsser dedans la soudure, ainsi qu'une portion de la plaque, et mastiquant celle-ci sur le bouchon afin de ne pas l'échauffer par le contact de la main, et que l'on pose l'une sur l'autre les deux plaques, il n'y a aucun effet produit à égalité de température; mais pour peu qu'on les fasse glisser légèrement avec frottement l'une sur l'autre, chacune d'elles prend un excès d'électricité contraire dont la recomposition par l'intermédiaire du fil multiplicateur donne naissance à un courant électrique. En soumettant ainsi à l'expérience un certain nombre de plaques métalliques, on forme le tableau suivant, dans lequel chaque métal est négatif par rapport à ceux qui le suivent, et positif par rapport aux métaux qui le précèdent :

Bismuth.
Palladium.
Platine.
Plomb.
Étain.
Nickel.
Cobalt.
Cuivre.
Or.
Argent.
Iridium.
Zinc.
Fer.
Cadmium.
Arsenic.
Antimoine.
Anthracite.
Peroxyde de manganèse.

On voit que la plupart des métaux qui jouissent à peu près des mêmes propriétés physiques et chimiques, ou qui se trouvent associés ensemble dans la nature, sont placés à côté les uns des autres; nous citerons le palladium et le platine, le plomb et l'étain, le nickel et le cobalt, le cuivre, l'or et l'argent, le zinc, le fer et le cadmium : l'iridium fait exception. Ce rapprochement n'est pas sans intérêt, puisqu'il tend à montrer, comme on l'a déjà avancé, que les propriétés électriques des corps ont des rapports plus ou moins directs avec leurs propriétés physiques ou chimiques. On verra plus loin que cet ordre est le même que celui obtenu avec des circuits composés de deux métaux semblables, quand on élève la température des points de jonction. Nous examinerons jusqu'à quel point la chaleur intervient dans le frottement. Les effets étant encore les mêmes quand les surfaces sont dépolies, doivent dépendre, par conséquent, de la nature particulière de chaque métal.

Au lieu de plaques, opérons avec des cylindres fer et cuivre, d'un décimètre de longueur, et de manière que les mêmes points de l'un d'eux parcourent continuellement la surface du second; ces points étant continuellement soumis à l'action du frottement, s'échaufferont davantage que les points de la surface du second, et cependant le résultat sera encore le même que si l'inverse avait lieu. Cette expérience prouve que le plus ou moins de frottement, et par suite le plus ou moins de chaleur dégagée, n'exerce aucune influence sur l'espèce d'électricité prise par chaque corps. Tâchons d'interpréter les effets produits : prenons deux lames, l'une de bismuth, l'autre d'antimoine, soudées chacune à l'un des bouts du fil d'un multiplicateur; si on les frotte l'une sur l'autre, il y a dégagement d'électricité. Les deux électricités, devenues libres, se recombinent aussitôt, partie sur la surface même du contact, partie en suivant le fil du multiplicateur; de sorte que l'aiguille aimantée n'accuse qu'une très-faible portion des électricités devenues libres. Pour avoir un maximum d'effet, il faut, tout en maintenant le contact, séparer rapidement les parties frottées; on conçoit, en effet, qu'une portion des deux électricités éprouve d'autant moins de difficulté à suivre le circuit du multiplicateur pour se recombiner, que la distance qui sépare les parties frottées est plus grande, c'est-à-dire que le frottement a été plus rapide. L'expérience suivante vient à l'appui de cette explication. Au lieu de passer les deux lames l'une sur l'autre avec frottement, si on les presse ou qu'on les frappe fortement, mais de manière à éviter un frottement latéral, il ne se produit pas de courant, et par conséquent

point de dégagement apparent d'électricité, quoique les surfaces soient plus fortement ébranlées que lorsque l'on frotte les deux lames légèrement l'une sur l'autre. Il faut donc, puisque les mêmes points des surfaces restent constamment en contact, que l'électricité dégagée sur chacune des lames n'ait plus eu besoin, pour se recombiner, de suivre le fil du multiplicateur, et que la recomposition se soit opérée instantanément au contact même des parties pressées.

Si l'on obtient des effets électriques dans le frottement de deux métaux hétérogènes, on les retrouve encore dans le frottement des molécules liées entre elles par la force d'agrégation. Voici comment M. Peltier le prouve : On prend un fil de cuivre non recuit, d'une vingtaine de mètres de longueur, que l'on met en rapport avec un multiplicateur thermo-électrique; puis on forme un grand cercle, soutenu de distance en distance par des supports; on le place alternativement dans le méridien magnétique, dans un plan perpendiculaire ou dans une position intermédiaire, afin de faire la part inductive du globe. L'équilibre de température étant établi, on soulève ou l'on baisse une partie du fil; il se forme alors des flexions qui ne peuvent avoir lieu sans un déplacement de particules, et par suite, sans qu'il y ait dégagement d'électricité. Quelquefois il arrive qu'il n'y a aucun effet produit, parce que tout est symétrique de chaque côté de la partie qu'on a courbée : mais il suffit d'écrouir une portion de l'arc, au moyen de la torsion ou de la percussion, ou bien de la recuire, pour faire naître ensuite un courant par la simple flexion du fil. Ce courant ne peut être attribué à l'induction terrestre, puisqu'il se manifeste, quelle que soit la position du circuit par rapport au méridien magnétique.

On obtient encore un courant en frottant un fil avec les doigts ou avec du drap; on le provoque même en étirant à la filière un fil de cuivre recuit, dont les deux bouts sont en communication avec un multiplicateur.

Pour concevoir ces phénomènes, il faut se rappeler les effets électriques de clivage. Nous avons montré que lorsqu'on détruisait la force d'agrégation, chacune des parties séparées possédait un excès d'électricité contraire, dont la nature devait dépendre de l'espèce de polarité que possédait la face de la molécule en contact avec celle de l'autre, en admettant, bien entendu, comme tout porte à le croire, que toutes les faces de la même molécule ne jouissent pas des mêmes propriétés; car si cela n'avait pas lieu, on ne voit pas comment l'attraction moléculaire pourrait s'exercer entre des particules dont tou-

tes les faces seraient douées des mêmes propriétés. Cela posé, lorsque l'on déplace momentanément, par le frottement ou autre action mécanique, les molécules d'un fil ou d'une lame de métal, on opère en quelque sorte un clivage momentané qui doit rendre libres les deux électricités entourant deux molécules contiguës, et si une portion de ces deux électricités, par des circonstances que nous ne pouvons prévoir, trouvait de la facilité à suivre le circuit du multiplicateur pour reformer du fluide neutre, il y aurait alors un courant qui réagirait sur l'aiguille aimantée. Ne pouvant pénétrer par aucun moyen dans l'intérieur des corps opaques, on ne peut qu'indiquer la cause générale des effets, et nullement les circonstances particulières qui déterminent le courant électrique à cheminer dans un sens, dans un autre, ou à ne pas se manifester.

Dans les recherches relatives à la production des courants électriques au moyen des actions mécaniques, il faut se mettre en garde contre l'induction magnétique terrestre, dont l'action est telle, que l'on ne peut remuer un corps conducteur sans y faire naître des courants instantanés. Nous devons donc, dès à présent, entrer dans quelques détails sur l'action inductive du globe.

On sait que lorsqu'un corps électrisé est placé à peu de distance d'un autre qui ne l'est pas, l'électricité naturelle de ce dernier est décomposée; l'électricité de signe contraire à celle du premier est attirée, tandis que l'électricité de même nom est repoussée dans la partie opposée. On dit alors que le corps est électrisé par influence. Il se produit un effet analogue quand un fil de métal, parcouru par un courant électrique, est placé à peu de distance d'un autre fil de métal formant un circuit fermé. Si les deux bouts du fil sont en rapport avec un multiplicateur, on obtient, en fermant le circuit, un courant instantané dirigé dans un sens opposé du premier, tandis qu'il chemine dans le même sens quand on interrompt le circuit. Nous ferons connaître plus tard les moyens à l'aide desquels on met cette propriété en évidence.

On produit également un courant d'induction en introduisant dans une hélice électro-magnétique en rapport avec un multiplicateur, la moitié d'un aimant; le sens du courant dépend du pôle introduit; en retirant l'aimant, le courant est dirigé en sens inverse. Or, le globe terrestre, pouvant être considéré comme un aimant formé de courants circulant de l'est à l'ouest, doit produire également des effets d'induction dans les lames métalliques, pour peu qu'on les change de place. L'expérience suivante ne laisse aucun doute à cet égard.

On prend un fil de cuivre de trois mètres de longueur et d'un millimètre de diamètre, on le met en communication avec les deux extrémités du fil du multiplicateur, puis on lui donne la forme d'un rectangle dont la partie supérieure peut être portée en avant ou en arrière sur le multiplicateur, tandis que la partie inférieure et le multiplicateur qui lui est attaché, restent immobiles. Toutes les fois que l'on fait passer le fil sur le multiplicateur, de droite à gauche, l'aiguille est déviée sur-le-champ. La déviation a lieu dans un autre sens, quand on fait repasser le fil en sens inverse de la première fois. En répétant souvent ces mouvements de manière à ne pas contrarier les oscillations de l'aiguille aimantée, on finit par obtenir une déviation de 90°. L'effet produit croît avec la longueur du fil mobile et l'espace qu'il parcourt.

On conçoit après cela, que, lorsque l'on frotte deux lames de métal, on doive se mettre en garde contre les effets d'induction magnétique que nous venons d'indiquer. Nous allons montrer l'erreur que l'on commettrait si l'on n'y avait pas égard.

Si l'on place horizontalement, dans le méridien magnétique, une lame de cuivre de cinq décimètres de long et de six centimètres de large en communication avec un multiplicateur, et qu'on passe dessus, avec frottement, une seconde lame de même métal également en relation avec le multiplicateur, et tenue à la main avec un manche de bois, afin que la chaleur de la main n'échauffe pas le métal; douze frictions, dirigées toujours du nord au sud, produisent une déviation de l'aiguille aimantée. Dans une expérience, le sens de la déviation annonçait que la lame avait pris l'électricité négative; les frictions opérées du sud au nord produisirent une déviation de même étendue, mais en sens inverse.

En laissant toujours la grande lame dans le méridien magnétique, et l'y plaçant *de champ*, c'est-à-dire, de manière que la face de six centimètres soit verticale, les frictions de la face occidentale, quelle que soit d'ailleurs cette face, conduisent toujours à une déviation notablement plus forte que les frictions de la face orientale. M. Peltier, auquel est due cette expérience, a reconnu que lorsque la lame de cuivre est dans une position horizontale, le frottement de la face supérieure donne toujours une plus forte déviation de l'aiguille aimantée que le frottement de la face tournée vers la terre; des lames de zinc, de plomb et d'étain se comportent de même.

On voit donc que, dans les expériences relatives au dégagement d'électricité produit par le frottement des métaux ou autres corps

conducteurs, on ne saurait se dispenser de se mettre en garde contre les effets d'induction terrestre, quand ce dégagement, toutefois, donne naissance à des courants électriques; car il n'en est plus de même si l'on a pour but seulement d'observer des effets de tension. Pour obtenir ces derniers, il faut adopter un autre mode d'expérimentation. L'un des métaux doit être réduit en limaille plus ou moins fine, mais non en poussière capable d'adhérer aux surfaces sur lesquelles on les projette. On fixe une lame de métal, ou plutôt un plateau de métal, à l'extrémité supérieure de la tige verticale d'un électroscope de Bohnenberger; l'on tient au-dessus, dans une position inclinée, la lame de métal sur laquelle on veut exercer le frottement, et qui est mise en communication avec la terre, afin de donner écoulement à l'électricité qu'elle prend dans le frottement des limailles; sans quoi cette électricité porterait une perturbation dans les effets cherchés. On prend des limailles que l'on met dans une capsule de métal ou autre, et on les projette sur la lame inclinée. En tombant elles n'y font que séjourner un instant très-court, et viennent se rendre dans la capsule, en lui communiquant l'électricité qu'elles ont prise dans leur frottement sur la lame, et dont la présence est accusée par l'électroscope. Voici les résultats obtenus avec diverses limailles : la limaille d'un métal, en tombant sur une lame de ce métal, prend un excès d'électricité négative, et la lame un excès d'électricité contraire. L'effet est d'autant plus marqué que la limaille est plus fine et le choc plus rapide. Les métaux en limaille se comportent donc, par rapport aux métaux en masse, comme les corps dépolis relativement aux corps polis dans les phénomènes de frottement. Cette propriété est moins sensible avec l'or, l'argent et le platine qu'avec les métaux oxydables. La limaille de cuivre est négative avec les lames de zinc, de plomb, d'étain, de fer, de bismuth, c'est-à-dire, avec les métaux plus oxydables que le cuivre, tandis qu'elle ne donne aucun signe d'électricité avec le platine, l'or et l'argent. En soumettant d'autres limailles à l'expérience, et comparant les résultats, on est conduit à admettre que les métaux en limaille, quand ils tombent sur une lame de métal, ont une grande tendance à prendre l'électricité négative; mais que cette tendance n'empêche pas que la limaille d'un métal oxydable ne soit positive, par rapport aux métaux les moins oxydables. On trouve effectivement que le zinc en limaille est positif, par rapport aux substances en lame dont les noms suivent : le platine, l'or, l'argent, le carbure de fer, le persulfure de fer, le cuivre et l'étain; il est négatif, au contraire, par rapport au zinc, au bismuth, à

l'antimoine et au fer, mais plus fortement avec le premier qu'avec les autres; il ne donne enfin aucun signe d'électricité avec le peroxyde de manganèse.

Les oxydes métalliques ainsi que leurs sulfures sont négatifs par rapport à leurs métaux respectifs. Il faut éviter, nous le répétons, que les poussières soient trop fines, sans cela elles adhèrent aux surfaces, et les effets de frottement sont nuls.

Pour interpréter ces résultats généraux, il faut prendre en considération, 1° la force d'agrégation; 2° la différence d'ébranlement qu'éprouvent les molécules des surfaces des limailles et des lames; 3° l'oxydation des métaux; 4° l'influence de la chaleur dégagée; 5° l'action des métaux les uns sur les autres. Nous n'avons pas encore toutes les données nécessaires pour examiner l'influence de ces différentes causes. Nous nous contenterons seulement de rapporter les résultats obtenus, quand on fait varier successivement la température des lames et celle des limailles.

LIMAILLE. État électrique à la température ordinaire.	LAME MÉTALLIQUE. État électrique à la température ordinaire.	EFFETS obtenus en portant la température des lames jusqu'à 60°.	EFFETS obtenus en élevant la température des limailles jusqu'à 60°.
1er groupe zinc +	Platine — Or — Argent — Cuivre — Plombagine —	Le zinc devient négatif.	Le zinc devient plus fortement négatif.
2e groupe zinc —	Zinc + Fer + Bismuth + Antimoine +	Les effets augmentent.	Ils augmentent également.
3e groupe peroxyde de manganèse +	Or — Platine — Cuivre — Zinc —	Les effets sont fortement exaltés.	

On voit dans le premier groupe qu'à mesure qu'on élève la température, soit de la limaille de zinc, soit des lames, les résultats sont inverses de ceux que l'on obtient à la température ordi-

naire; dans les deuxième et troisième groupes, que la chaleur exalte le pouvoir négatif du zinc et celui du peroxyde de manganèse. La tendance de la limaille de zinc, à devenir négative par l'action de la chaleur, est donc telle que, lorsqu'elle est positive, elle perd peu à peu cette faculté, devient nulle, puis négative. La chaleur agit par conséquent ici comme le fait ordinairement la division mécanique.

Ces faits tendent à montrer que les causes qui président au dégagement de l'électricité dans le frottement des limailles sur les lames de métal, se rattachent à l'état d'agrégation des molécules; et que, s'il était possible d'isoler une particule d'un métal quelconque, et qu'on la laissât tomber sur une lame de ce métal, cette molécule serait éminemment négative, en même temps qu'elle s'échaufferait considérablement, puisque la force d'agrégation ne serait plus là pour enchaîner son action.

Si l'on veut savoir jusqu'à quel point la vitesse avec laquelle les limailles se séparent des lames influe sur le phénomène, il faut soumettre le frottement à un mode d'action régulier qui permette d'opérer toujours dans les mêmes circonstances. Voici le procédé qui remplit ce but : on prend une horloge qui imprime un mouvement de rotation rapide à une tige verticale, à l'extrémité supérieure de laquelle est fixée une lame de métal horizontale. Lorsqu'on projette sur cette lame des limailles quelconques, elles sont lancées aussitôt à une distance qui dépend de la vitesse de rotation; de sorte que leur contact avec la lame n'est qu'instantané. En posant l'appareil sur un électroscope à feuilles d'or, on reconnaît aussitôt l'électricité acquise par la lame; par exemple, le peroxyde de manganèse en poussière très-fine, projeté sur une lame de zinc, d'étain ou d'or, soumise à un mouvement rapide de rotation, prend l'électricité négative : l'argent très-divisé et le sulfure de fer en poudre donnent les mêmes résultats. Le peroxyde de manganèse est une des substances qui donnent le plus grand effet; l'action de l'air n'influe en rien sur le phénomène, puisqu'il est le même, que le métal soit oxydable ou non. La limaille de zinc ne donne aucune électricité quand elle tombe sur une lame de même métal dont le mouvement est rapide, tandis qu'elle est négative quand la lame est en repos.

Cette expérience indique que la vitesse de rotation imprimée à la lame de zinc augmente la tendance négative, et que, dans la même circonstance, pour conserver à la limaille sa faculté négative, il faudrait pouvoir la projeter en poudre d'une grande ténuité.

Du dégagement de l'électricité par frottement dans les corps mauvais conducteurs.

Passons aux effets électriques de frottement dans les corps mauvais conducteurs, effets qui varient et dans leur nature et dans leur intensité, en raison de causes tellement légères, qu'elles échappent à toutes nos investigations. Ne pouvant rattacher tous ces faits à des principes généraux, ce qu'il y a de mieux à faire, est de s'en tenir aux propriétés fondamentales qui seules peuvent nous servir de guides dans leur étude.

Pour procéder avec méthode et aller du simple au composé, nous soumettrons d'abord à l'expérience des corps semblables, mais dont toutes les parties n'éprouvent pas également l'action du frottement, afin de reconnaître les causes les plus influentes sur la production du phénomène. Lorsqu'on frotte en croix, l'un sur l'autre, deux rubans de soie blancs pris dans la même pièce, celui qui est frotté transversalement prend l'électricité négative, et l'autre l'électricité positive. Or, les points du premier éprouvant plus l'action du frottement que les points du second, se trouvent par là soumis à un ébranlement plus considérable, et s'échauffent aussi plus que les autres. Ces deux causes exercent une grande influence sur la nature de l'électricité que prend un corps mauvais conducteur dans son frottement contre un autre corps également mauvais conducteur.

Deux rubans de soie noirs produisent les mêmes effets; il en est encore de même d'un ruban noir et d'un ruban blanc, lors même que l'action du frottement est la même sur chaque ruban, condition facile à remplir. En opérant avec deux tampons dont l'un est recouvert d'un morceau de ruban blanc, l'autre d'un morceau de ruban noir, et les frottant l'un contre l'autre, on trouve que le premier prend l'électricité positive, et le second l'électricité négative; or, comme les deux étoffes ne diffèrent entre elles que par la matière colorante, il faut donc que celle-ci intervienne d'une manière quelconque, et dans le mode d'ébranlement des parties, et, par suite, dans la chaleur émise. Or, la soie noire, qui a un pouvoir absorbant plus grand que la soie blanche, devant s'échauffer plus que celle-ci, se trouve dans une circonstance convenable pour acquérir l'électricité négative. En général, si, avant de frotter deux corps l'un contre l'autre, on élève préalablement la température de l'un d'eux, on augmente sa tendance négative.

Prenons encore deux corps semblables, mais ne différant que par

l'état de leurs surfaces, tels que deux tubes de verre dont l'un est poli et l'autre dépoli, ou bien deux bâtons de gomme laque se trouvant dans ces mêmes états; si l'on frotte les deux premiers l'un contre l'autre, en ayant eu soin de bien les sécher auparavant et de les tenir pendant quelque temps dans un milieu desséché par le chlorure de calcium, le tube dépoli prend l'électricité négative. Il en est de même du bâton de gomme laque dépoli. On voit donc que dans le frottement de deux corps, celui dont les particules de la surface peuvent se déplacer plus facilement tend à prendre l'électricité négative.

En résumé, voilà trois causes qui augmentent la tendance négative : un frottement plus grand, un accroissement de chaleur et une surface dépolie ou couverte d'aspérités, ou bien une constitution fibreuse. L'état des surfaces a une telle influence sur la nature de l'électricité dégagée, qu'il existe une substance minérale cristallisée, le *disthène*, qui prend l'électricité positive sur certaines faces, et l'électricité négative sur d'autres, avec le même frottoir, sans qu'on puisse apercevoir de différences sensibles dans l'état moléculaire des surfaces.

Passons aux corps de nature différente. Si l'on applique sur une planche de sapin bien sèche, une feuille de papier également bien sèche, et qu'on passe rapidement sur cette dernière, avec frottement, un morceau de caoutchouc, le papier, qui est électrisé par le frottement, agit assez fortement par influence sur le bois pour y adhérer, de manière à éprouver une résistance quand on veut l'enlever. Si l'expérience se fait dans l'obscurité et dans une pièce très-sèche, on aperçoit une traînée lumineuse à l'instant de la séparation.

Coulomb a observé qu'une bande de papier chauffée, frottée contre une étoffe de laine blanche ou de soie blanche, prend toujours l'électricité négative; quand l'équilibre de température est rétabli, elle ne donne le plus souvent que des signes d'électricité positive. Le même effet a lieu, mais sans anomalie, avec une étoffe de soie noire et de bon teint, tandis que l'effet est contraire quand cette étoffe est à demi usée.

Un ruban de soie blanc chauffé prend toujours l'électricité négative dans son frottement contre un métal, tandis qu'en le laissant refroidir, il donne des signes très-faibles d'électricité positive quand le métal est très-poli.

Il n'en est pas de même d'un ruban de soie noire; chauffé ou non, il prend toujours l'électricité négative, quand il est soyeux et de bon teint, dans son frottement contre un métal.

On a vu précédemment qu'en frottant un ruban de soie blanc

contre un autre de soie noire, le premier prend toujours l'électricité positive ; mais si le ruban noir est usé et que le ruban blanc soit chauffé, ce dernier donne des signes d'électricité négative tant qu'il est chaud, et devient positif en se refroidissant.

Un ruban de soie, une bande de papier, une étoffe de laine, etc., frottés contre une peau encore garnie de ses poils, prennent toujours l'électricité négative.

Tous ces résultats tendent à prouver qu'outre les causes déjà signalées, les tissus, les fibres de matière animale et végétale, dont les parties sont plus ou moins lâches, et qui peuvent éprouver, par cela même, plus de déplacement dans le frottement que celles des surfaces métalliques, prennent plus habituellement l'électricité négative.

Dans les expériences précédentes, rien ne montre qu'il y ait eu adhérence entre les corps ou action chimique; ainsi, les effets produits doivent être attribués soit à une différence dans le mode de vibration des particules, soit à une répartition inégale de chaleur dans chacun des deux corps, par suite de laquelle les molécules de l'un d'eux acquièrent plus de mobilité.

L'immersion de différents corps dans le mercure donne lieu à des effets électriques complexes que nous devons faire connaître, parce qu'ils serviront encore à nous montrer l'influence qu'exercent sur leur production les causes déjà signalées. On distingue trois modes d'immersion : immersion brusque, immersion lente, et immersion qui consiste à enfoncer doucement le corps dans du mercure et à l'y laisser plus ou moins de temps. Les corps, avant l'expérience, doivent être maintenus constamment dans un flacon contenant de la chaux caustique. Voici les principaux résultats que l'on obtient :

Le verre, le soufre, le succin et la cire d'Espagne ne sont pas ordinairement électriques à la température de 10° par aucun des trois modes; il en est de même jusqu'à + 18°, pourvu qu'ils soient à égalité de température avec le mercure. Cependant le succin commence à devenir électrique par le choc à plus de 11°, la cire d'Espagne à plus de 15°, et le verre à plus de 20°; mais il faut avoir constamment l'attention de laisser ces corps dans le mercure assez de temps pour que l'équilibre de température s'établisse, et de les retirer ensuite lentement. Entre 80 et 100°, le pouvoir électrique s'éteint par immersion brusque, et, en général, une température élevée éteint le pouvoir électrique comme une température basse.

Ces résultats montrent de nouveau l'influence de l'ébranlement des particules et de la chaleur sur le dégagement de l'électricité, influence

qui doit se faire sentir plus facilement sur le soufre, le succin et la cire d'Espagne que sur le verre. Dans les expériences précédentes, les corps étaient à égalité de température avec le mercure; mais s'il y a une différence d'un degré seulement, tous ces corps deviennent électriques; cependant il y a des limites; car un cylindre de verre chauffé à 100° n'est pas électrique quand on le plonge dans du mercure à +15°; il en est encore de même en opérant d'une manière inverse. Une tige de verre, avons-nous dit, n'est pas excitable dans le mercure à égalité de température entre certaines limites; au delà elle le devient. La nature de l'électricité varie encore suivant la différence de température entre les deux corps.

La tige est positive lorsque sa température est un peu plus élevée que celle du mercure; elle est, au contraire, négative, lorsqu'il y a un plus grand intervalle.

En général, avec le succin, le soufre, la cire d'Espagne, les effets du choc sont plus marqués que ceux du simple contact; on voit donc encore l'influence de l'ébranlement des parties pour exciter la puissance électrique.

Des substances composées de parties flexibles, telles que le coton, le papier et la laine, sont très-électriques par les trois modes d'immersion, depuis + 10° jusqu'à 80°, même à égalité de température avec le mercure. Il s'ensuit que la faculté électrique augmente avec celle qu'éprouvent les particules des corps à perdre leur position naturelle d'équilibre; il suffit souvent d'un très-léger ébranlement, tel que celui provenant de la rupture de l'action attractive exercée par le mercure sur les corps, pour dégager de l'électricité. Examinons des cas encore plus compliqués.

Lorsque l'on frotte l'un contre l'autre deux corps qui n'ont pas le même degré de dureté, et que l'un d'eux cède, par conséquent, à l'autre, une partie de sa substance, au bout de quelques instants, le frottement ne s'exercera plus entre les deux corps, mais bien entre le corps le plus tendre et la portion de ce corps qui a été déposée sur le plus dur. On a alors des effets électriques complexes, selon que le métal le moins dur est oxydable ou non; de là une foule d'erreurs dans lesquelles sont tombés les physiciens qui se sont occupés de déterminer l'espèce d'électricité que prend un corps dans son frottement contre un autre. M. de la Rive, qui a étudié ce genre d'effets, a opéré avec des frottoirs plus ou moins durs, tels que la peau du doigt, l'ivoire, la corne, le liége, diverses espèces de bois bien sec, et a pris pour corps frottés les métaux qui cèdent, soit

leur propre substance, soit leurs oxydes, quand on les a frottés pendant quelque temps. Pour avoir des effets instantanés, on doit poser les lames de métal sur le plateau supérieur d'un électroscope à feuilles d'or. Toutes les fois que l'on passe légèrement le doigt ou l'une des substances ci-dessus énoncées sur une lame de métal, quand les surfaces sont parfaitement sèches, il y a toujours dégagement d'électricité, lequel est nul pour peu qu'il y ait une couche d'eau hygrométrique adhérente à ces corps.

Tous les métaux ne prennent pas la même espèce d'électricité. Le bismuth, par exemple, est positif, et l'antimoine négatif.

Antimoine..........................	—
Peau...............................	+
Bismuth............................	+
Peau...............................	—

Le rhodium, le platine, le palladium, l'or, le tellure, le cobalt et le nickel, prennent souvent l'électricité négative; tandis que l'argent, le cuivre, le laiton et l'étain, qui sont aussi négatifs, donnent quelquefois l'électricité positive. L'antimoine est le plus *négatif de tous*; le zinc et le fer sont assez variables; quant au plomb et au bismuth, ils sont constamment positifs. Tous ces effets s'expliquent très-bien à l'aide des principes précédemment indiqués.

On a vu plus haut que les métaux cédaient aux frottoirs, soit une portion de leur substance, soit de l'oxyde qui formait une couche sur le frottoir; de sorte que dans ce dernier cas, le frottement avait lieu entre le métal et son oxyde qui est toujours négatif par rapport à ce métal. Mais quand la couche d'oxyde a acquis une certaine épaisseur, et qu'elle ne peut plus être enlevée, le frottement a lieu entre deux couches d'oxyde, et il n'y a pas d'effets électriques. En ayant égard à ces diverses circonstances, on peut expliquer les anomalies qui se présentent dans les expériences. Si l'on frotte doucement les métaux avec des corps tels que le liége et le caoutchouc, on enlève facilement la couche d'oxyde, et l'on obtient alors l'électricité positive sur les métaux. Ces résultats montrent combien il faut prendre de précautions dans les recherches relatives au dégagement d'électricité par frottement.

On a imaginé des appareils à l'aide desquels on recueille le plus possible des électricités dégagées dans le frottement de deux corps. Ces appareils, appelés *machines électriques*, sont décrits dans tous les traités de physique, ainsi nous pouvons nous abstenir d'en

parler; nous dirons seulement quelques mots de l'appareil de M. Péclet, pour étudier l'influence qu'exercent le temps, la vitesse, la pression sur le dégagement d'électricité par frottement, attendu que nous ne partageons pas entièrement son opinion sur les conséquences qu'il a déduites de ses expériences. Cet appareil est disposé de manière à rendre variables ou constantes à volonté ces trois conditions ; il se compose des parties suivantes :

1° D'un cylindre de verre traversé par un axe en fer; 2° d'un frottoir en bois ayant la courbure du cylindre, et sur lequel on peut établir différentes lames flexibles; 3° de deux tiges métalliques placées à la partie supérieure du frottoir, et destinées à recevoir des poids; 4° d'un peigne métallique placé sur un support isolant, et communiquant avec un électromètre à pailles terminé par deux boules de sureau dont l'écartement peut être déterminé au moyen d'un cadran placé convenablement.

En employant pour frottoir le papier nu ou couvert de cuivre, d'étain, d'argent ou d'or, l'étain en feuilles, la soie, le coton, avec les conditions précédemment énoncées, la tension va en augmentant pendant un certain temps qui est très-court, après quoi elle reste constante. La manivelle fait une révolution en huit, quatre, deux secondes, et la vitesse est la même pendant un certain temps.

Avec les frottoirs ci-dessus indiqués et des cylindres de verre, de résine et de taffetas ciré, la tension est indépendante de la vitesse, excepté avec des corps garnis de longs filaments, et dont nous n'avons pas à nous occuper ici.

Si l'on décharge le cylindre avec une frange métallique placée du côté opposé au peigne, la tension diminue avec la vitesse, et d'autant plus que le frottoir est plus mauvais conducteur : la quantité d'électricité paraît donc proportionnelle à la vitesse quand on emploie la frange.

Relativement à l'influence de la pression, le mouvement de rotation étant uniforme, M. Péclet a mis le frottoir sous la pression de 1 à 2 kilogrammes, et a soumis successivement à l'expérience des cylindres en verre, en résine ou en bois, enveloppés de taffetas ciré ou de satin. Quant aux frottoirs, ils étaient les mêmes que précédemment; la déviation des deux pailles a été constante pour chaque corps, quelle que fût la pression, que le cylindre fût déchargé ou non. M. Péclet a expliqué ce dernier résultat de la manière suivante : le contact réel n'existe que sur une partie de l'étendue du contact apparent. Ce sont effectivement les points qui se touchent qui supportent la pression,

qui frottent et produisent de l'électricité. Le nombre et l'étendue de ces points doit augmenter avec la pression, mais dans un rapport avec la charge et qu'il est bien difficile d'apprécier : au delà donc d'une certaine pression, le nombre des points de contact n'augmente pas, et l'influence de la pression doit cesser.

Il résulte des faits observés par M. Péclet, que la pression et la vitesse sont sans influence sur les effets produits, et que la quantité d'électricité est proportionnelle à la vitesse, quelle que soit la pression. Dans l'explication que ce physicien a donnée des faits observés, il a fait abstraction de l'électricité qui se recombine à la source même où elle se dégage, quand on ne met aucun obstacle à cette recomposition. C'est faute d'avoir négligé cette recomposition que d'autres personnes ont été également induites en erreur dans les explications qu'elles ont données des phénomènes produits dans le dégagement de l'électricité par frottement; en effet, on ne doit jamais perdre de vue les considérations suivantes : 1° lorsque la décomposition des deux électricités dans le frottement s'effectue plus rapidement que la recomposition, la tension électrique augmente; 2° si la recomposition se fait dans un temps appréciable, plus on tournera vite, plus la tension maximum augmentera. On conçoit parfaitement qu'il arrive un certain point, quand on tourne rapidement, où la tension de l'électricité dégagée est telle, qu'une portion des deux électricites se recombine malgré la mauvaise conductibilité des corps frottés; il en sera de même au fur et à mesure que la tension augmentera. D'après cela, l'on doit arriver à une tension maximum que l'on ne saurait dépasser, attendu que les deux électricités se recombinent toujours au contact, le frottement n'étant pas tellement instantané, que la séparation des deux corps ne puisse s'effectuer dans un temps infiniment petit. Voilà comment il faut entendre que le dégagement de l'électricité est indépendant de la pression et de la vitesse du frottement.

Des effets de frottement dans les gaz et dans le vide.

Dans les expériences précédentes, il n'a été question que du dégagement de l'électricité par frottement dans l'air. Voyons ce qui arrive quand on opère dans le vide ou dans les gaz. Les anciens physiciens se sont beaucoup occupés du dégagement d'électricité dans le vide. Nous citerons particulièrement Hawksbée, Gray, Dufay, etc.; mais nous rapporterons les expériences de ce dernier physicien, auquel l'électricité doit l'une de ses belles découvertes.

Dufay a fait usage d'nn récipient ouvert par le bas et fermé dans le haut par une boîte à cuir. Une tige de métal traversait la boîte, et entrait dans le récipient. Cette tige, à l'extrémité inférieure, était terminée en vis, dans les pas de laquelle était fixée, au moyen de filasse, une boule forée de succin, de verre ou de toute autre substance. L'extrémité supérieure de la tige était garnie d'une petite poulie que l'on mettait en mouvement au moyen d'un archet. Dans l'intérieur du récipient se trouvait une pince garnie d'étoffe ou de toute autre substance qui embrassait et serrait le corps soumis au frottement; des fils suspendus dans le récipient indiquaient, en se portant vers ces corps, s'ils avaient été électrisés ou non. Dufay trouva que dans le vide fait à trois lignes, tous les corps cités plus haut, ayant été frottés, attiraient comme dans l'air; Boyle confirma ce résultat.

On peut rendre compte des effets produits, en disant que les corps soumis à l'expérience, étant mauvais conducteurs, conservaient, pendant plus ou moins de temps, l'électricité acquise par le frottement, lors même que l'air n'exerçait plus de pression sur eux.

Dufay soumit à l'expérience une boule solide de cristal de roche, en prenant pour frottoir une feuille de papier. Il trouva que les effets n'étaient pas aussi sensibles dans le vide que dans l'air, mais que la boule devenait électrique, lorsqu'on faisait rentrer l'air. Ce physicien crut devoir conclure de ce résultat et d'autres que nous ne rapportons pas, que les corps qui donnent l'électricité résineuse, tels que le succin, la gomme copale, etc., l'acquièrent dans toutes sortes de milieux, tandis que les corps vitreux ne prennent que peu d'électricité dans le vide, quoiqu'ils la conservent dans ce vide, lorsqu'ils l'ont acquise dans l'air. Cette différence tient très-probablement à ce que la vapeur d'eau, au fur et à mesure qu'on raréfie l'air, s'attache plus facilement aux substances vitreuses qu'aux substances résineuses.

Le dégagement de l'électricité dans le vide a peu attiré l'attention des physiciens depuis le commencement de ce siècle, attendu que la théorie mathématique qui rend compte de l'équilibre de l'électricité sur la surface des corps, tendait à rejeter toute recherche de ce genre. En effet, d'après cette théorie, l'électricité n'étant retenue à la surface des corps que par la résistance de l'air, on ne devait pas supposer qu'ils pussent conserver de l'électricité dans le vide, quelque faible que fût sa tension.

Nous allons indiquer des faits qui ne paraissent pas compatibles

avec cette théorie. M. Harris a fait une expérience qui confirme les observations de Hawksbée et de Gray. Une boule de cuivre d'environ 2 po. angl. de diamètre fut placée au centre d'un grand récipient, et parfaitement isolée, puis mise en communication, après avoir été électrisée, avec un électroscope, au moyen d'une tige de cuivre passant dans une boîte à cuir ; elle fit dévier l'électroscope de 40°. Cette divergence s'est maintenue quand on a enlevé les $\frac{56}{60}$ de l'air contenu dans le récipient. Une boule semblable, non électrisée, approchée de la première au moyen d'une baguette, exerçait une action telle à mesure que cette boule s'approchait, que l'électroscope commençait à baisser, et s'élevait de nouveau dès qu'on l'éloignait. L'expérience suivante vient à l'appui de ce fait :

Sur une platine portative, pouvant s'adapter à une machine pneumatique, pl. VI, fig. 9, on place un petit électroscope à feuilles d'or, dont la tige métallique porte à sa partie supérieure une lame de métal très-mince, sur laquelle est placée une lame de verre, le moins hygrométrique possible. Ce petit appareil est recouvert d'une cloche, ayant à sa partie supérieure une tubulure munie d'une virole portant une boîte à cuir, dans laquelle passe une tige verticale en laiton, à l'extrémité inférieure de laquelle est placé un petit tampon de peau recouvert d'or mussif ou d'autres enduits excitants. En abaissant la tige, on met en contact le tampon avec le verre, et l'on peut exercer le frottement en tournant la tige. La lame de verre forme alors un petit tableau magique. La lame métallique se trouve électrisée négativement, et les deux feuilles d'or divergent en vertu de cette électricité. En faisant le vide à un millimètre, on trouve constamment de l'électricité qui, loin de se dissiper, puisqu'il n'existe plus qu'une quantité d'air très-faible, reste pendant un temps assez considérable, lorsque les vapeurs aqueuses de l'intérieur de la cloche ont été préalablement enlevées par du chlorure de calcium. Nous avons trouvé, dans une expérience, qu'il y avait encore de l'électricité libre au bout de dix jours. Doit-on admettre que la très-petite quantité d'air contenue dans le vase fût capable, par sa pression, de retenir l'électricité sur la surface des feuilles d'or, ou bien que le vide pût servir à isoler parfaitement des quantités d'électricité qui ne dépassent pas une certaine limite? C'est ce que nous examinerons bientôt. Pour l'instant, nous nous bornerons à dire que des expériences récentes tendent à prouver que si un corps électrisé se trouvait dans un vide parfait, loin d'objets pouvant exercer sur lui aucune action électrique par influence, ce corps conserverait indéfiniment son électricité. Certes, ce principe,

s'il était bien établi, forcerait à modifier la théorie mathématique de l'électricité, qui admet que celle-ci n'est retenue uniquement à la surface des corps que par la résistance des milieux ambiants.

Passons au dégagement de l'électricité par frottement dans différents milieux. Plusieurs physiciens se sont occupés successivement de cette question; Wollaston d'abord, puis M. Gay-Lussac et M. Péclet.

Wollaston a cherché à prouver, de la manière suivante, que le dégagement de l'électricité dans le frottement était dû à une oxydation. Il a établi un petit cylindre avec ses coussins enduits d'amalgame très-oxydable de zinc ou d'étain, et ses conducteurs dans un vase tellement disposé, qu'il pouvait enlever à volonté l'air qu'il renfermait et le remplacer par un gaz. Après avoir essayé le degré d'énergie de l'appareil dans l'air, il substitua de l'acide carbonique à l'air, et trouva que tout développement d'électricité était suspendu, et qu'il se manifestait aussitôt que l'on introduisait l'air atmosphérique dans le vase. Ayant enduit les coussins d'un amalgame d'argent, de platine, d'un métal non oxydable enfin, tout dégagement d'électricité cessait; il en conclut que celui-ci était dû à une oxydation.

M. Gay-Lussac répéta ces expériences, et trouva qu'il se dégageait également de l'électricité avec des amalgames très-oxydables dans une atmosphère d'acide carbonique, pourvu que ce gaz fût privé de la plus grande partie de son eau hygrométrique. Cette expérience ayant infirmé les résultats annoncés par Wollaston, de nouvelles recherches devenaient nécessaires pour fixer définitivement les idées à cet égard; c'est ce que fit M. Péclet, qui commença d'abord par déterminer le pouvoir conducteur de l'air et des gaz employés, dans la supposition où ce pouvoir agirait sur les effets observés. A cet effet, il fit construire deux balances de Coulomb, parfaitement semblables, chacune d'elles étant percée d'un orifice dans lequel était mastiqué un petit tube de verre renfermant une tige de cuivre terminée par des boules métalliques égales, destinées à transmettre de l'électricité aux disques de clinquant. L'intérieur du vase communiquait au dehors par deux tubes, dont l'un s'élevait jusqu'à son sommet, et l'autre seulement à une petite distance du fond. Ces tubes étaient destinés à changer le gaz renfermé dans les vases. Le tube servant à l'introduction des gaz communiquait avec un large tube extérieur rempli de chlorure de calcium. Un de ces appareils communiquait avec une soufflerie; l'autre, avec un appareil destiné à produire de l'acide carbonique. Après avoir donné aux deux boules

métalliques la même charge électrique, afin que les deux balances fussent chargées au même degré, il fit passer dans une d'elles un courant d'air sec, et dans l'autre un courant d'acide carbonique également desséché. M. Péclet trouva que les déviations dans la balance remplie d'acide carbonique, après le même temps, comptées à partir de l'origine de la répulsion, étaient absolument les mêmes, et il en conclut que les facultés conductrices de l'air et de l'acide carbonique, pour les effets qu'il avait en vue, bien entendu, étaient les mêmes. Il admit alors que s'il existait une différence dans la quantité d'électricité développée par frottement dans ces deux gaz, cette différence ne pouvait provenir que d'une action directe du gaz dans la production de l'électricité.

Pour faire ces expériences de frottement dans différents gaz, il s'est servi d'une cloche traversée par une tige en fer, passant dans une boîte à cuir, et portant un cylindre de verre. La tige était mise en mouvement au moyen d'un système de deux roues mues par une manivelle. Un coussinet fixe, enduit d'or mussif, se trouvait sous la cloche, et, du côté opposé, un peigne métallique communiquait à un fil de cuivre qui en sortait, et se prolongeait jusqu'à un électroscope placé dans une cloche dont l'air intérieur était desséché par du chlorure de calcium. La première cloche était munie de deux tubes de verre, l'un destiné à amener le gaz desséché, l'autre à le faire sortir. En opérant avec l'air ou l'acide carbonique parfaitement desséché, que l'on faisait passer dans le vase pendant un temps assez long pour que la cloche ne renfermât plus que $\frac{1}{18}$ d'air, et en tournant la manivelle avec une vitesse sensiblement la même, M. Peclet obtint les mêmes résultats dans les deux cas.

Avec de l'hydrogène parfaitement sec, il eut le même effet; et il en conclut alors, contradictoirement à ce qu'avait annoncé Wollaston et conformément à ce qu'avait observé M. Gay-Lussac, que, dans la production de l'électricité dans le frottement, l'action de l'air sur les enduits plus ou moins oxydables des frottoirs n'était pas aussi directe que le pensait le physicien anglais.

Cette conclusion est rigoureuse, et pourrait être tirée immédiatement des expériences de Gray, puisque le dégagement d'électricité a lieu dans le vide comme dans l'air.

Les expériences précédentes prouvent bien que la présence de l'oxygène n'est pas nécessaire pour la production de l'électricité par frottement, mais nullement que celle-ci ne provient pas d'une action chimique, car il pourrait bien se faire qu'il s'opérât des réactions chi-

miques entre les parties constituantes des amalgames par suite du frottement auxquelles on pourrait rapporter le dégagement d'électricité. C'est une question que nous aurons bientôt l'occasion d'examiner.

CHAPITRE IV.

Du dégagement d'électricité dans les actions chimiques.

Nous avons posé en principe que, toutes les fois que les molécules des corps perdent leur position d'équilibre par une cause quelconque, il y a dégagement d'électricité; nous l'avons prouvé quand elles sont ébranlées, séparées par des actions mécaniques; il s'agit de montrer actuellement qu'il en est encore de même quand les éléments des corps se séparent ou se réunissent pour former de nouvelles combinaisons. Les expériences qui vont suivre ne laisseront aucun doute à cet égard. Nous allons étudier successivement le dégagement de l'électricité : 1° dans la réaction des dissolutions les unes sur les autres; 2° dans la réaction des acides ou des dissolutions salines sur les métaux; 3° dans la réaction de deux métaux différents sur un ou plusieurs liquides; 4° dans la combustion; 5° dans la décomposition chimique; 6° dans la décomposition de l'eau oxygénée par divers corps; 7° dans les dissolutions en général; 8° dans l'action chimique de la lumière; 9° et enfin dans les actions capillaires.

Le dégagement de l'électricité dans les réactions chimiques a été longtemps un sujet de controverse entre les physiciens et les chimistes, attendu que les moyens d'expérimentation manquaient pour mettre ce fait en évidence, et surtout pour en faire connaître les lois; mais la découverte d'Œrsted a mis à notre disposition des moyens tels que nous pouvons résoudre aujourd'hui complétement cette question. Laissant de côté les essais plus ou moins infructueux qui ont été faits pour parvenir à sa solution, abordons de suite les faits généraux.

Présentons d'abord quelques exemples du dégagement d'électricité dans les actions chimiques pour en avoir de suite une idée nette.

Premier exemple. Lorsque l'on plonge l'un après l'autre dans l'acide nitrique ordinaire les deux bouts du fil de cuivre d'un multiplicateur, on a aussitôt un courant électrique qui réagit sur l'ai-

guille aimantée de telle manière que le bout plongé le premier prend au liquide l'électricité positive. Cet effet est dû à la différence des actions chimiques exercées par l'acide sur les bouts du fil, différence en faveur du bout plongé le dernier qui est le plus attaqué, attendu que sa surface est recouverte d'une couche d'oxyde. Dès lors, quand un acide réagit sur un métal, celui-ci dégage de l'électricité négative et l'acide l'électricité positive. En exposant les phénomènes thermo-électriques, nous prouverons que le dégagement de chaleur dans la réaction chimique n'est point la cause du phénomène.

Deuxième exemple. Plongeons dans de l'acide nitrique pur deux bouts de deux fils d'or à surface très-propre, en communication par les deux autres bouts avec les extrémités du fil d'un multiplicateur à fil long, il ne se produit aucun effet; mais si l'on ajoute une très-petite quantité d'acide chlorhydrique près de la partie immergée de l'un des deux bouts, l'aiguille aimantée accuse aussitôt, par sa déviation, la production d'un courant électrique; le bout attaqué prend à l'acide l'électricité négative, et lui donne l'électricité positive. En remplaçant l'un des fils d'or par un fil de platine, les effets sont les mêmes, c'est-à-dire, qu'il n'y a production de courant qu'autant qu'on ajoute de l'acide hydrochlorique, et le bout attaqué prend encore l'électricité négative. Cette expérience met hors de doute ce fait fondamental, que lorsqu'un acide réagit sur un métal, l'acide prend l'électricité positive, le métal l'électricité négative. Bien que l'effet produit paraisse simple, il est cependant complexe, comme on va le voir; mais, pour l'analyser complétement, nous allons exposer les effets électriques produits dans la réaction des dissolutions les unes sur les autres.

Effets électriques produits dans la réaction des dissolutions les unes sur les autres.

Lorsqu'un métal est attaqué par un liquide quelconque, il y a toujours production de chaleur, formation d'un composé qui exerce une réaction sur le liquide environnant pendant que s'opère le mélange. Voilà deux causes qui troublent l'équilibre des forces électriques : pour l'instant, occupons-nous de la dernière, et commençons par l'examen des effets électriques produits dans la combinaison d'un acide et d'un alcali, l'un et l'autre à l'état liquide. On prend deux capsules en porcelaine, dans l'une on verse une solution de potasse, et dans l'autre de l'acide nitrique; dans chacune de ces solutions, on plonge une lame de platine que l'on met en communication avec l'un des bouts du fil d'un multiplicateur, et l'on fait communiquer les

deux liquides au moyen d'une mèche de coton ; à l'instant où l'on ferme le circuit, l'aiguille aimantée est fortement déviée, et accuse un dégagement considérable d'électricité ; la direction du courant indique que l'acide a pris l'électricité positive et l'alcali la négative. Si l'on veut avoir des effets plus énergiques, on opère de la manière suivante : on prend une cuiller de platine et une pince de même métal que l'on met en communication avec le multiplicateur ; on remplit la cuiller d'acide, et on fixe entre les branches de la pince un morceau de potasse ; à l'instant où l'on plonge ce dernier dans l'acide, on a un courant très-énergique dirigé comme il est dit précédemment ; mais cette méthode d'expérimentation, ainsi que les précédentes, n'est pas à l'abri des objections des physiciens qui admettent des effets électriques de contact indépendamment des réactions chimiques. Pour éviter ces objections, on opère ainsi : on prend deux capsules en platine remplies d'acide nitrique, et mises en communication avec un multiplicateur à fil long avec deux lames de platine ; on place les deux capsules à un décimètre de distance l'une de l'autre, et on les fait communiquer au moyen d'une mèche de coton imbibée d'eau, et soutenue convenablement au milieu ; cette mèche, en raison de sa longueur et de la différence de poids spécifique des deux liquides, s'oppose longtemps à leur réunion ; vers le milieu, on pose doucement avec un tube, à côté l'une de l'autre, une goutte d'acide et une goutte de la solution alcaline. Tant que les deux gouttes sont séparées, il n'y a aucun effet produit ; mais dès l'instant que leur réunion a lieu, il y a production d'un courant électrique qui annonce que l'acide a laissé dégager de l'électricité positive et l'alcali de l'électricité négative, comme dans les expériences précédentes ; dans ce cas, on ne peut attribuer l'effet produit au contact du platine d'une part avec l'acide, de l'autre avec l'alcali, puisque le platine est en contact de chaque côté avec de l'acide nitrique ; en substituant d'autres liquides à l'acide et à l'alcali, on a les résultats suivants :

L'acide uitrique est positif avec
- l'acide hydrochlorique.
- — acétique.
- — nitrenx.
- les dissolutions alcalines.
- — de nitrate.
- — de sulfate.
- — de chlorures neutres.

L'acide nitrique est négatif avec { l'acide sulfurique. / — phosphorique.

L'acide phosphorique est positif avec { l'acide hydrochlorique. / — sulfurique. / les dissolutions alcalines, salines, etc.

On voit que l'acide phosphorique est le plus positif de tous les liquides; or, le contact de l'acide nitrique avec la dissolution de nitrate de cuivre, et en général la réaction d'un acide avec une de ces dissolutions, ne devant être considérés que comme des dissolutions, on doit en conclure que celles-ci produisent des effets électriques analogues à ceux qui ont lieu dans les combinaisons.

Pour observer les effets électriques produits dans la réaction des acides et des alcalis sur l'eau, et des dissolutions neutres les unes sur les autres, on opère de la manière suivante : si l'acide est solide, on en fixe un morceau entre les branches d'une pince de platine, et on le plonge dans l'eau que contient la cuiller; s'il est liquide, on plonge d'abord une éponge de platine en communication avec un multiplicateur dans la dissolution acide; on trouve alors que l'eau se comporte comme un alcali : avec les dissolutions alcalines, les effets sont inverses. On tire de là la conséquence que l'eau, en s'unissant à un acide, se comporte comme un alcali, et qu'elle joue, au contraire, le rôle d'acide dans sa réaction sur les alcalis.

Quant aux sels neutres, on ne peut opérer que sur des solutions à différents degrés de concentration, car ils ne sont pas conducteurs à l'état solide. L'expérience prouve qu'avec des solutions neutres celles qui sont le plus concentrées sous le rapport des effets électriques, se comportent à l'égard de celles qui le sont moins, comme les acides dans leurs combinaisons avec les alcalis. Les doubles décompositions opérées dans la réaction de deux solutions de sels neutres ne donnent lieu à aucun effet électrique; le mode d'expérimentation est analogue au précédent, aussi ne nous y arrêterons-nous pas. Ce fait prouve que, dans les doubles décompositions, il y a neutralisation complète des deux électricités dégagées. Il est nécessaire, d'une part, que les deux solutions soient parfaitement neutres, car l'excès d'acide ou d'alcali de l'une d'elles, en réagissant sur l'eau de l'autre, donnerait lieu à des effets électriques; de l'autre, que les deux solutions renferment des quantités atomiques égales des deux sels.

Lorsqu'une solution de potasse et un acide communiquent ensemble au moyen d'un tube coudé rempli d'eau, il y a réaction de l'a-

cide et de l'alcali sur l'eau, d'où résultent des effets électriques dirigés dans le même sens que si l'acide réagissait immédiatement sur l'alcali, et qui s'ajoutent quand les deux solutions communiquent au moyen d'un fil de platine.

Nous venons de voir que les dissolutions, en réagissant les unes sur les autres, donnent lieu à des effets électriques analogues à ceux que l'on observe dans les combinaisons; il faut montrer actuellement comment on peut reconnaître, par ces effets, s'il y a simplement combinaison ou solution, ce qui n'est pas toujours facile en chimie quand les réactions sont tellement faibles qu'il en résulte de si petites quantités de composés qu'il est impossible d'en constater l'existence, ou bien quand il y a de très-faibles variations de température. Pour cela on opère de la manière suivante, d'après M. Peltier: l'appareil complet se compose de deux multiplicateurs, d'une pile thermo-électrique et de deux capsules en platine. On en prend une, que l'on met en communication avec l'un des bouts du fil d'un multiplicateur à fil long, puis un trépied thermo-électrique composé de trois couples, bismuth et antimoine, dont les extrémités inférieures sont de rang pair ou impair, afin qu'étant échauffées ou refroidies en même temps, elles produisent des courants dirigés dans le même sens; on pose la seconde capsule en communication avec l'autre bout du fil du multiplicateur sur le trépied ou pile thermo-électrique qui est en relation avec un multiplicateur à fil court, et l'on joint les deux capsules au moyen d'une mèche de coton ou d'asbeste. On verse dans chaque capsule une dissolution, et les deux dissolutions agissent l'une sur l'autre par l'intermédiaire de la mèche d'asbeste ou de coton. S'il y a combinaison, les deux capsules s'échauffent; celle qui repose sur le trépied lui communique de la chaleur qu'elle a prise, laquelle est aussitôt accusée par l'aiguille du multiplicateur thermo-électrique. S'il y a simplement solution, l'abaissement de température de la capsule produit un courant thermo-électrique dirigé en sens inverse du premier, de sorte que la direction du courant thermo-électrique suffit pour indiquer quand il y a combinaison ou solution, lors même que les variations de température qui en résulteraient seraient excessivement faibles, et exigeraient des thermomètres d'une grande sensibilité pour être appréciées. Nous donnons ici le tableau des résultats obtenus par M. Peltier sur le sens du courant, la chaleur dégagée dans les réactions de l'eau, des acides ou des sels acides, neutres ou alcalins, ou diverses substances, de sorte que l'on peut voir immédiatement quand il y a combinaison ou solution.

NOMS DES SUBSTANCES.	SENS DU COURANT dirigé de l'eau vers la substance.			TEMPÉRATURE exprimée en degrés du multiplicateur.		CLASSIFICATION des corps sous le point de vue du rôle qu'ils jouent dans les combinaisons.
Acide sulfurique	Une seule goutte donne	90°	+	Chaleur maximum	90°	Acide ou —
— nitrique	Cinq gouttes —	70	+	Chaleur	70	Id. —
— acétique	1/4 d'acide —	30	+	Id.	10	Id. —
— borique	Faible courant	5	+	Froid	50	Id. —
Protochlorure d'antimoine	—	35	+	Chaleur	60	Id. —
Nitrate de bismuth	—	35	+	Froid	50	Id. —
Sulfate de cuivre	—	30	+	Id.	10	Id. —
Dissolution d'iode	—	20	+		0	Id. —
Acétate de plomb	—	10	+	Froid	20	Id. —
Sulfate de zinc	—	5	+	Id.	60	Id. —
Chlorhydrate de strontiane	—	10	+		0	Id. —
Chlorure de plomb	0° à froid à chaud	5°	+	Froid très-faible	2°	Id. —
Solution chaude de nitrate d'ammoniaque	—	5	+		0	Id. —
Sucre ordinaire	—	5	+	Froid	10	Id. —
Alcool	—	5	+	Chaleur	40	Id. —
Acide sulfurique	1/3 acide —	30	—	Id.	5	Alcali ou +
— hydrochlorique	Id. —	30	—	Id.	50	Id. +
— citrique	Extrêmement faible	2		Froid	40	Id. +
— tartrique	—	Id.		Id.	15	Id. +
— benzoïque	—	Id.		Id.	5	Id. +
— oxalique	—	Id.		Id.	50	Id. +
Potasse	—	80°	—	Chaleur	70	Id. +
Soude	—	Id.	—	Id.	Id.	Id. +
Chaux	—	30	—	Id.	70	Id. +
Sous-carbonate de potasse	—	30	—	Froid	70	Id. +
Iodure de potassium	—	20	—	Id.	80	Id. +
Nitrate de potasse	—	10	—	Id.	Id.	Id. +
Sulfate de potasse	—	5	—	Id.	45	Id. +
Oxalate acidulé de potasse	0° à froid, à chaud	5	—		0	Id. +
Chlorhydrate d'ammoniaque	—	4°	—	Froid	80	Id. +
Nitrate d'ammoniaque	—	3	—	Id.	90	Id. +
Alun à base d'ammoniaque	—	4	—	Id.	5	Id. +
Cyanure de potassium	—	30	—	Id.	30	Id. +
Chlorure de sodium hydraté	—	30	—	Id.	60	Id. +

Les résultats consignés dans ce tableau indiquent que les solutions acides, neutres ou alcalines, peuvent être divisées en trois classes, relativement à l'intensité des effets électriques produits dans leur réaction et à la chaleur dégagée. La première comprend les corps qui ne donnent aucun signe ou des signes faibles d'électricité dans

leur combinaison ou dans leur solution. Ces effets peuvent provenir de ce que les liquides ne sont pas bons conducteurs, ou de causes encore inaperçues; mais ces mêmes corps sont précisément ceux qui donnent le plus grand abaissement de température. La deuxième classe comprend les corps qui donnent des effets diminuant ou neutralisant le refroidissement produit par leur dissolution. Dans la troisième se trouvent les corps qui, en se combinant, dégagent assez de chaleur pour élever la température du liquide. Le nitrate d'ammoniaque fait partie de la première, la solution d'iodure et de chlorure de plomb fait partie de la seconde, les acides sulfurique et nitrique, de la troisième. A la vérité, les effets de chaleur dont il est question peuvent être reconnus, la plupart du temps, au moyen de thermomètres très-sensibles et à petit réservoir; mais un thermomètre n'a jamais assez de sensibilité pour accuser des effets instantanés quand ils sont très-faibles. Dans ce cas, il n'y a que les courants thermo-électriques qui puissent être invoqués.

Après avoir exposé avec des développements suffisants, tout ce qui concerne les effets électriques produits dans la réaction des dissolutions les unes sur les autres, de manière à faire ressortir les lois qui les régissent, nous allons étudier ces mêmes effets dans la réaction des acides et des dissolutions salines en général sur les métaux. Reprenons l'expérience déjà citée, page 412. Soient deux capsules A et A remplies d'acide nitrique, et communiquant ensemble au moyen d'une mèche d'asbeste, si l'on prend deux lames d'or et que l'on mette chacune d'elles en communication par un bout avec une des extrémités du fil d'un multiplicateur, et que l'on plonge les deux bouts libres, chacun dans une capsule, il n'y a aucun effet électrique produit toutes les fois que les surfaces ont été lavées avec soin dans de l'eau distillée, pour enlever les corps étrangers adhérents; mais si l'on verse dans la capsule A quelques gouttes de chlorure d'or près de la lame qui y plonge, l'aiguille aimantée est aussitôt déviée fortement, dans un sens tel que le bout A devient négatif par rapport au liquide; si, au lieu de la dissolution, on verse quelques gouttes d'acide hydrochlorique, l'effet est le même. Dans le premier cas, l'effet est dû à la réaction de l'acide nitrique sur le chlorure d'or; dans le deuxième, à la réaction de l'eau régale sur l'or, et à celle de la dissolution formée sur l'acide nitrique. Voilà deux causes qui donnent lieu à un dégagement d'électricité dans le même sens, attendu que la dissolution d'or est négative par rapport à l'acide; on ne peut donc

douter que la réaction des deux liquides n'exerce une influence sur les effets électriques observés dans la reaction de l'eau régale sur l'or. Cette expérience montre combien il est difficile de déterminer immédiatement le dégagement de l'électricité, dans l'acte même de la combinaison d'un métal avec un acide, abstraction faite de la réaction de la dissolution qui se forme sur le liquide environnant. On y parvient néanmoins de la manière suivante :

On remplit deux capsules A et A′ d'une dissolution de nitrate de cuivre, que l'on met en communication au moyen d'une mèche de cocon ; et l'on plonge dans chacune d'elles le bout d'une lame de cuivre parfaitement décapée, dont l'autre est en relation avec un multiplicateur : il ne se produit aucun effet électrique ; mais si l'on verse une goutte d'acide nitrique dans le liquide de la capsule A, le cuivre qui plonge dedans devient fortement négatif. Dans ce cas, on a bien l'effet électrique résultant de la réaction du métal sur l'acide ; car le courant produit dans la réaction de la dissolution qui se forme sur la dissolution environnante, doit être très-faible, et même nul, dans le cas où la solution de nitrate est saturée.

L'étain et son sulfate, le fer et son hydrochlorate, le plomb, l'antimoine et le bismuth agissent de même que le cuivre par rapport à ses dissolutions, quand on ajoute quelques gouttes d'acide. Il en est encore de même du zinc, du fer, avec les dissolutions de leur nitrate. Le métal s'empare de l'électricité négative, conformément au principe général ; mais avec des dissolutions de leur sulfate, ces deux derniers métaux produisent quelquefois des effets inverses ; à l'instant où l'on ajoute quelques gouttes d'acide sulfurique, le métal devient positif. On voit donc combien il est important, dans les appareils destinés à produire de l'électricité au moyen des actions chimiques, de prendre en considération les effets résultant de la réaction des dissolutions les unes sur les autres, car il peut arriver quelquefois que cette réaction, qui est une cause puissante de dégagement d'électricité, contrarie les effets que l'on a en vue.

Voyons ce qui se passe dans la réaction de deux métaux différents sur un ou plusieurs liquides. Pour bien interpréter ces effets, il faut partir du principe que lorsqu'un métal est attaqué, il dégage de l'électricité négative, et l'acide de l'électricité positive. Il s'ensuit que lorsqu'on plonge deux métaux, en communication par un fil métallique, dans un acide ou autre liquide actif, on a un courant électrique dû à la différence des effets produits. Dès lors, si l'on veut atteindre le

maximum d'effet, il faut que l'un des deux soit attaqué, et que l'autre ne le soit pas ; car, à effets égaux des deux côtés, le courant est nul.

Analysons quelques cas. Le plus simple est celui-ci : chaque métal en relation avec un multiplicateur, plonge dans une capsule remplie du même liquide, et la communication est établie entre les deux capsules, au moyen d'une mèche d'asbeste; soient une lame de cuivre, une lame de zinc et une solution de sulfate de zinc. A l'instant de l'immersion le cuivre prend au liquide l'électricité positive et le zinc l'électricité négative. Ce fait nous démontre, comme du reste on devait le présumer, que le zinc est plus attaqué par le liquide que ne l'est le cuivre. Supposons la déviation de l'aiguille aimantée de 62°, si l'on ajoute quelques gouttes d'acide nitrique ou de nitrate de cuivre dans la capsule où se trouve la lame de cuivre, et où l'action chimique est la moins forte, l'aiguille aimantée, au lieu de rétrograder, parce que le cuivre est plus attaqué, se porte à 86°, et reste stationnaire dans cette position. Ce fait n'est pas une anomalie, comme on pourrait le croire, car il suffit pour l'expliquer de tenir compte de la réaction de l'acide nitrique ou du nitrate de cuivre sur le sulfate de zinc. Dans cette réaction, la solution de nitrate de cuivre étant positive, par rapport à celle de sulfate de zinc, on a un courant dans le même sens que le premier ; il est naturel en effet que la somme de ces deux courants donne un courant plus fort que le premier. Cette explication est la seule que l'on puisse donner, car si l'on ajoute la même quantité d'acide nitrique dans l'autre capsule, l'intensité du courant est diminuée sensiblement, ce qui ne peut provenir que de la réaction de l'acide nitrique ou du nitrate de zinc formé sur le sulfate, et d'où résulte un courant en sens inverse de celui qui est produit par la réaction du sulfate sur le zinc. Nous avons opéré avec ce dernier sel, afin de montrer l'influence qu'exerce sur l'intensité du courant la réaction des solutions les unes sur les autres. Cette influence est telle, que nous croyons devoir nous y arrêter encore, pour exposer des faits propres à faire ressortir son importance. Voici le mode d'expérimentation le plus simple qu'on puisse employer pour observer ces faits :

On prend une petite boite en verre ou en bois vernissé, divisée en deux compartiments au moyen d'un diaphragme en baudruche, appliqué soigneusement sur les parois avec du mastic, et dans chacun desquels on verse une solution de même nature ou de nature différente. Supposons que l'on opère d'abord avec de l'eau renfermant $\frac{1}{50}$ d'acide

sulfurique, et plongeons d'un côté une lame de zinc, de l'autre une lame de cuivre, l'une et l'autre en communication avec un multiplicateur. Voici les résultats d'une expérience :

LIQUIDE contenu dans la case cuivre.	LIQUIDE contenu dans la case zinc.	DURÉE de l'immersion.	DÉVIATION de l'aiguille aimantée.
Eau et $\frac{1}{30}$ d'acide sulfurique.	Id.	0	63°
		15 minutes.	53
		30	46

On a recommencé les expériences après avoir essuyé les lames. En premier lieu, la déviation a encore été de 63°. En ajoutant quelques gouttes d'acide nitrique dans la case cuivre, le courant a augmenté d'intensité, quoique le cuivre fût attaqué et qu'il dût en résulter un courant en sens inverse. Cet effet a déjà été expliqué, nous n'y reviendrons pas. Nous donnons seulement les résultats obtenus.

Outre la cause susmentionnée, on doit encore en faire intervenir une autre. L'acide nitrique, en attaquant le cuivre, facilite le passage du courant du liquide dans ce metal, et doit augmenter par conséquent l'intensité du courant, comme les résultats suivants le prouvent :

LIQUIDE contenu dans la case cuivre.	LIQUIDE contenu dans la case zinc.	DURÉE de l'immersion.	DÉVIATION de l'aiguille aimantée.
Eau et $\frac{1}{30}$ d'acide sulfurique, à laquelle on ajoute $\frac{1}{50}$ d'acide nitrique ou d'une dissolution saturée de nitrate de cuivre.	Eau et $\frac{1}{30}$ d'acide sulfurique.	0	81
		15 minutes.	73
		30	63

Passons au cas où le cuivre plonge dans une dissolution saturée de nitrate de cuivre, et le zinc dans une dissolution saturée de sulfate de zinc, on obtient alors les résultats suivants :

LIQUIDE contenu dans la case cuivre.	LIQUIDE contenu dans la case zinc.	DURÉE de l'immersion.	DÉVIATION de l'aiguille aimantée.
Dissolution saturée de nitrate de cuivre.	Dissolution saturée de sulfate de zinc.	0	84
		15 minutes.	72
		30	68

Ces résultats mettent en évidence l'influence produite par la réaction des deux dissolutions l'une sur l'autre, puisque le courant est plus intense que dans les expériences précédentes, toutes choses égales d'ailleurs, et bien que le zinc ne soit pas attaqué avec autant de force que lorsque la dissolution était acide. D'après ce mode d'opérer, le courant n'est pas encore constant, mais on y parvient au moyen de la disposition suivante :

LIQUIDE contenu dans la case cuivre.	LIQUIDE contenu dans la case zinc.	DURÉE de l'immersion.	DÉVIATION de l'aiguille aimantée.
Eau $\frac{1}{30}$ d'acide sulfurique.	Eau $\frac{1}{2}$ d'acide sulfurique, et $\frac{1}{30}$ nitrique.	0	62
		15 minutes.	64
		30	61

Les déviations étant successivement égales à 62°, 64°, 61°, on voit que le courant tend à devenir constant ; cet effet tient à ce que l'acide nitrique, passant lentement à travers la membrane, va décaper la lame de cuivre et enlever les corps qui, s'y déposant, tendent à produire un courant en sens inverse. En général, pour obtenir un courant constant, on dispose l'appareil, et on choisit les liquides qui servent à le faire fonctionner, de manière à ce que les lames métalliques soient toujours très-propres. Il faut pour cela que les liquides dissolvent les substances à mesure qu'elles sont déposées sur les lames par le courant.

Les expériences précédentes démontrent que si l'on veut construire des appareils simples, produisant des courants à peu près constants, il faut remplir deux conditions : la première est de séparer les deux

liquides avec un diaphragme qui permette une réaction lente entre eux, et qui n'apporte que le plus faible obstacle possible à la circulation du courant; la seconde, d'employer des substances métalliques dont les surfaces ne donnent pas lieu à des courants secondaires, lesquels, agissant en sens inverse, tendent continuellement à affaiblir fet du courant primitif. Avant de décrire la construction et l'usage des appareils électro-chimiques simples à courant constant, il est indispensable de parler des diaphragmes, des propriétés du zinc amalgamé et des lames mises en contact avec les gaz.

Des diaphragmes.

Puisqu'il est bien démontré que pour avoir un courant intense en employant un circuit composé de deux métaux et de deux liquides différents, il est nécessaire que l'un des deux métaux soit attaqué par l'une des deux dissolutions, et que celles-ci réagissent lentement l'une sur l'autre, afin que les effets électriques qui en résultent, s'ajoutent avec ceux produits par la réaction du liquide sur le métal, on ne peut remplir ces conditions qu'autant que les deux liquides sont séparés par un diaphragme qui leur soit perméable, et laisse le courant passer, sans qu'il en résulte une perte sensible dans son intensité. Ce diaphragme doit varier de nature et d'épaisseur suivant la nature des liquides et l'intensité du courant; car plus celui-ci est intense, plus on peut donner d'épaisseur au diaphragme. Jusqu'ici on a employé sept espèces de diaphragmes, savoir : 1° baudruche, vessie; 2° peau, cuir tanné; 3° toile à voile à texture serrée, planches minces de sapin ou de bois à tissu fibreux; 4° kaolin (argile exempte de chaux); 5° porcelaine dégourdie, terre demi-cuite comme celles des *alcarazas;* 6° têtes de pipe, creusets; plâtre gâché; et 7° enfin le carton légèrement goudronné. Nous allons passer en revue les avantages et les inconvénients de ces divers diaphragmes, dont plusieurs peuvent être avantageusement employés dans les applications de l'électricité aux arts.

La baudruche et la vessie sont les diaphragmes qui, en raison de leur peu d'épaisseur, opposent le moins de résistance à la transmission du courant; ils ne peuvent servir que dans les expériences de recherches, et encore quand les solutions ne sont ni acides ni alcalines, ou qu'elles ne renferment aucuns sels d'or, d'argent ou de platine, dont les oxydes sont réduits par les matières organiques; car alors les agents chimiques les détruisent promptement. La présence des métaux

réduits sur leur surface présente des inconvénients dont il va être question ci-après.

Le cuir et la peau tannés à sec, c'est-à-dire tannés sans corps gras, ont à la vérité les mêmes inconvénients ; mais étant plus résistants, leur durée est plus longue et leur emploi avantageux. Le cuir doit être plongé pendant plusieurs jours dans l'eau, afin d'enlever toutes les matières organiques solubles ; quand il a séjourné dans l'eau salée, qu'il a été laissé à l'air et qu'on le fait servir de nouveau, il acquiert une densité telle que les courants ne passent plus. Cet effet est dû non-seulement à la cristallisation du sel marin dans les pores du cuir, mais encore à la formation d'un composé que l'eau chaude ne saurait dissoudre. D'après cela il faut, toutes les fois que les diaphragmes ont été plongés dans l'eau salée, les remettre tremper dans l'eau, afin d'éviter les effets signalés. On conçoit que l'on puisse donner de grandes dimensions à des diaphragmes de ce genre, en réunissant plusieurs peaux par une couture à points serrés, et goudronnant les points de suture. De semblables diaphragmes bien préparés tiennent longtemps le liquide sans perte sensible ; le seul inconvénient est l'épaisseur souvent un peu forte du cuir. La peau chamoisée et la peau en général sont trop perméables au liquide. On ne peut les employer que dans le cas où les deux liquides possèdent un très-faible degré d'endosmose. Le cuir préparé avec des corps gras ne peut convenir, parce qu'il s'oppose au passage du courant.

La toile à voile est un des meilleurs diaphragmes, surtout avec des dissolutions neutres n'ayant qu'un faible degré d'endosmose, car le courant n'est pas sensiblement arrêté, et l'on peut enlever facilement les cristaux de sel résultant de la réaction des deux dissolutions l'une sur l'autre. On peut donner aux diaphragmes de toile à voile la grandeur que l'on veut, ce qui est un avantage dans l'industrie ; la couture doit être faite avec un fil enduit de poix.

Les planches de sapin ou de tout autre bois fibreux à tissu lâche ne peuvent être employées que lorsqu'elles n'ont pas plus de deux à trois millim. d'épaisseur ; mais il faut encore avoir soin d'enlever la sève et les matières résineuses en plongeant le bois pendant longtemps dans de l'eau bouillante alcalisée ; ces diaphragmes ne peuvent servir que dans des cas assez bornés, car ils finissent par se cambrer lorsqu'ils sèchent.

Le kaolin ou l'argile exempte de carbonate de chaux est sans contredit la matière qui offre les plus grands avantages pour former des diaphragmes, attendu que l'on peut leur donner une épaisseur

de plusieurs centimètres sans que l'intensité du courant diminue sensiblement, pourvu toutefois que l'argile soit imbibée d'un liquide bon conducteur, et qu'elle ne soit pas trop fortement tassée. Un des grands avantages des diaphragmes d'une certaine épaisseur est que l'on retarde tellement le mélange des dissolutions, que nous avons vu souvent celui-ci ne pas s'opérer sensiblement pendant plusieurs mois. Il en résulte quelquefois aussi un inconvénient dont il faut se garantir. Lorsque deux dissolutions réagissent l'une sur l'autre par l'intermédiaire de l'argile, s'il se forme une combinaison hydratée, alors l'argile perd l'eau qui servait à l'humecter, et acquiert une compacité telle, que le courant finit par ne plus passer. C'est un motif pour placer dans le circuit une boussole destinée à faire connaître les variations du courant. Quand on reconnaît que l'argile a acquis trop de compacité, il faut l'enlever et la remplacer. On évite d'employer de l'argile qui renferme des carbonates, parce que lorsqu'un des liquides est acide, il se produit un dégagement d'acide carbonique qui vient porter le trouble dans l'appareil.

La porcelaine dégourdie est employée avec avantage, et offre plus de résistance que la terre demi-cuite ou les creusets et les têtes de pipe : seulement il faut avoir soin de laver les diaphragmes de temps à autre, afin d'enlever les sels qui, en cristallisant dans l'intérieur, finissent par faire éclater les parois. On peut à la vérité donner la même qualité aux creusets en leur faisant supporter un plus fort degré de cuisson. Les creusets sont les diaphragmes les plus commodes en raison de la facilité que l'on trouve à se les procurer ; seulement quand leurs parois sont trop épaisses, il faut diminuer cette épaisseur avec la lime et enlever la couche vernissée, s'il y en a ; sans quoi la terre ne s'imbiberait pas de liquide et le courant ne passerait pas. Les diaphragmes en plâtre peuvent être employés, mais non avec des dissolutions renfermant de l'acide sulfurique libre ; car l'acide sulfurique dissout peu à peu le sulfate de chaux, et le diaphragme finit par disparaître.

Le papier ou carton goudronné perméable au liquide est un bon diaphragme facile à préparer, le goudron n'étant employé que pour empêcher le carton de se délayer dans l'eau.

En général, toute substance perméable aux liquides, qui n'est pas attaquée ou délayée par eux, peut servir à établir des diaphragmes ; mais elle ne doit pas renfermer de matières conductrices de l'électricité, car il en résulterait, par suite du passage du courant, autant de centres d'actions décomposantes. En effet, toutes les fois qu'un

corps solide conducteur se trouve dans un liquide traversé par un courant, l'extrémité de ce corps qui regarde le pôle positif devient un pôle négatif, et l'autre extrémité un pôle positif, de sorte que le corps constitue un élément voltaïque qui, en réagissant sur le liquide ambiant, opère la décomposition des substances qu'il tient en solution. Il faut éviter d'après cela que les diaphragmes ne contiennent du charbon, des pyrites et autres substances métalliques : c'est à la présence de ces matières dans l'argile que des décompositions s'opèrent quelquefois dans la croûte du globe; nous en parlerons dans le deuxième volume.

Les substances organiques ne présentent pas cet inconvénient, car elles ne sont conductrices que quand elles sont mouillées; néanmoins, quand quelques-unes de leurs parties sont très-denses, elles peuvent servir d'éléments décomposants. Dans les liquides organiques il existe des globules qui peuvent servir de conducteurs. C'est une question que nous aurons l'occasion d'examiner.

Après avoir exposé ce qui concerne les diaphragmes, nous devons indiquer les substances métalliques les plus convenables pour éviter la polarisation et la production de courants en sens inverse. Pour les appareils simples il faut deux métaux, l'un oxydable ou producteur de l'électricité, lequel étant attaqué par un liquide prend l'électricité négative, tandis que le liquide s'empare de l'électricité positive qui est recueillie par le métal non oxydable.

Il est bien prouvé maintenant que lorsqu'on plonge deux lames de métal différent dans une solution neutre, acide ou alcaline, la direction et l'intensité du courant dépendent de l'action exercée par le liquide sur chacune des lames, et en particulier sur le métal le plus oxydable, ainsi que du pouvoir conducteur de la solution. On peut donc prévoir *à priori*, dans le plus grand nombre de cas, quand on connaît la nature de la solution et les deux métaux, dans quel sens sera dirigé le courant. Nous allons en citer quelques exemples. En plongeant deux lames dans de l'eau salée, l'une de cuivre et l'autre de zinc, en communication avec un multiplicateur, le zinc prend au liquide l'électricité négative, attendu qu'il est plus attaqué par celui-ci que ne l'est le cuivre; mais si le liquide est une solution de sulfure de potassium, le courant suit une direction opposée, parce que le cuivre est plus attaqué que le zinc. Une lame de cuivre et une lame d'étain plongées dans une solution acide et saline donnent naissance à un courant qui va, de l'étain au cuivre, à travers le liquide; tandis qu'avec l'ammoniaque le courant suit une direction opposée.

En plongeant dans de l'acide nitrique concentré et dans de l'acide nitrique étendu divers couples métalliques, on forme le tableau suivant, dans lequel chaque métal est positif par rapport à celui qui le précède.

Acide nitrique concentré.	Acide nitrique étendu.
Fer oxydé.	Argent.
Argent.	Cuivre.
Mercure.	Fer oxydé.
Plomb.	Fer.
Cuivre.	Plomb.
Fer.	Mercure.
Zinc.	Étain.
Étain.	Zinc.

Un couple or et cuivre ne donne aucun effet quand on emploie le mercure comme corps liquide. M. de la Rive a émis le doute que la formation de l'amalgame fût une véritable action chimique; mais cette assertion ne saurait être fondée, attendu qu'il y a combinaison en proportions définies; il y a sans nul doute aussi action électrique, mais le multiplicateur ne peut accuser le courant produit, car les deux électricités trouvent plus de facilité à se recombiner sur la surface de l'or et du mercure, qu'à suivre le fil du multiplicateur. En général, toutes les fois que le corps intermédiaire est meilleur conducteur ou même aussi bon que le fil du multiplicateur, la recomposition s'opère sur la surface même de contact. Le sens du courant dans un couple qui plonge dans un liquide est bien dépendant de l'énergie avec laquelle s'exerce l'action chimique sur l'un des éléments de ce couple, celui qui est le plus attaqué prend au liquide l'électricité négative. Mais peut-on, en augmentant la surface du métal le moins attaqué, comparer et même surpasser l'action la plus vive de ce liquide sur l'autre métal? M. de la Rive, qui a étudié cette question, a reconnu que cela a lieu quelquefois quand la différence entre les propriétés chimiques des métaux est peu de chose, mais qu'en général la somme d'un grand nombre d'actions chimiques très-faibles, sous le rapport des effets électriques produits, ne peut jamais égaler une action chimique très-forte, lors même que celle-ci ne s'exercerait que sur une très-petite surface.

Du zinc amalgamé.

Une plaque de zinc amalgamé possède la singulière propriété de ne pas être attaquée par de l'eau légèrement acidulée par l'acide sulfurique; mais si l'on vient à la toucher avec un fil de cuivre ou de platine,

l'action devient aussitôt vive, le zinc se dissout et l'hydrogène se dégage sur le fil qui devient le pôle négatif du couple voltaïque. On peut considérer cet effet comme une anomalie, car le mercure constituant par son contact avec le zinc et l'eau acidulée un couple voltaïque, le zinc devrait être plus attaqué que lorsqu'il ne lui est pas associé. Or, comme le contraire a lieu, il faut donc que les particules du zinc, par suite de leur contact avec le mercure, se trouvent dans le même état que les particules d'une lame de fer rendu inactif par l'acide nitrique.

On amalgame le zinc en le décapant dans de l'eau acidulée par l'acide sulfurique, et étendant dessus du mercure. Si on plonge dans de l'eau ainsi acidulée une lame de zinc ordinaire et une autre amalgamée, et qu'on les fasse communiquer au moyen d'un fil de cuivre, la lame amalgamée se comporte comme le zinc, et l'autre comme le cuivre dans un couple voltaïque ordinaire. Ce qui distingue les effets produits dans l'eau acidulée par une lame de zinc amalgamé en relation avec une lame de cuivre ou autre de ceux qui ont lieu avec une lame de zinc et une lame de cuivre, c'est que l'action chimique, d'ordinaire violente et intense sur le zinc, est tranquille et uniforme sur les lames de zinc amalgamé. De plus, les pouvoirs électriques sont plus fortement exaltés, et sont en jeu plus longtemps qu'avec du zinc seulement : en employant une solution d'acide nitreux, ces pouvoirs acquièrent un grand degré d'intensité. Voici les résultats d'une expérience de M. Faraday avec un couple zinc amalgamé et platine; la surface de chaque lame était de quatre pouces (anglais) carrés, et le liquide intermédiaire de l'eau acidulée par l'acide sulfurique :

Dans le premier moment, la déviation a été de 62°,5, puis

En 5 minutes	60°
10	57
15	55
20	52,5
25	49
30	48
35	47
40	46,50
45	46
50	45
55	45
60	45

L'appareil ayant fonctionné pendant une heure, le circuit fut interrompu pendant une minute, et la solution agitée avec les lames qu'elle contenait; puis, la communication rétablie, l'aiguille, après quelques oscillations, s'est arrêtée à 47°, c'est-à-dire que le courant a repris son intensité première. Le circuit étant resté fermé pendant une heure, la déviation était encore de 42°; au bout d'une heure, elle n'était pas changée. On trouve dans ce résultat une preuve que le zinc amalgamé peut être employé avec avantage dans la construction des piles à courant constant, mais d'où peuvent donc provenir les propriétés du zinc amalgamé? M. Faraday, qui s'est occupé de cette question, n'a pu la résoudre; mais cependant les réflexions qu'il a faites sont de nature à l'éclairer. Une solution de trente parties d'eau et d'une partie d'acide sulfurique n'agit que faiblement sur le zinc pur, tandis qu'elle attaque énergiquement le zinc du commerce. M. de la Rive a attribué cette différence à la présence du fer, du cadmium qui se trouvent dans le zinc impur, lesquels constituent autant de couples voltaïques; il résulte, en effet, de cette multiplicité d'actions, qu'il y a beaucoup de zinc détruit, et que l'hydrogène se dégage en apparence sur la surface, bien qu'en réalité ce dégagement n'ait lieu qu'à la surface des particules métalliques étrangères; on conclut évidemment de là que ces particules servent en même temps à décharger l'électricité du zinc, et diminuent ainsi le pouvoir qu'a ce métal de produire un courant électrique, ce qui fait que l'intensité du courant qui passe dans le circuit métallique se trouve beaucoup affaiblie. En amalgamant la surface de zinc, on amène la surface dans une condition uniforme qui détruit l'action des petits couples voltaïques. La difficulté est d'expliquer pourquoi la présence du mercure s'oppose à ce que le zinc soit attaqué tant qu'on ne le touche pas avec un fil de cuivre ou de platine. Tout ce qu'on peut dire à cet égard c'est que la surface du zinc étant partout recouverte de mercure, une partie ne peut agir comme déchargeur vis-à-vis de l'autre, dès lors l'action chimique est suspendue.

Deux avantages importants résultent de l'emploi des lames de zinc amalgamé. Le premier est que l'équivalent complet d'électricité s'obtient par l'oxydation d'une certaine quantité de zinc, c'est-à-dire que si l'on opère la décomposition d'un sel métallique en dissolution avec l'appareil simple, on obtient un équivalent de métal réduit pour un équivalent de zinc consommé.

Le second avantage est que le zinc ne soit pas attaqué quand le circuit n'est pas fermé; nous en signalerons un troisième. L'action

n'est pas régulière avec un couple dans lequel se trouve du zinc ordinaire, attendu que la perturbation portée dans le liquide par le gaz amène à la surface du zinc des quantités inégales d'acide qui ne décape pas également les surfaces, ce qui n'arrive pas avec le zinc amalgamé en raison de son action régulière.

Il paraîtrait que, lorsque la circulation du courant est gênée entre le zinc amalgamé et le cuivre ou le platine par la présence d'un diaphragme, la quantité de zinc consommée diminue également, ce qui établit une relation remarquable entre l'intensité du courant, la quantité de zinc dissoute et la quantité de sel métallique décomposé, relation que nous ne pouvons expliquer. Nous avons encore plusieurs points à examiner avant de décrire les appareils simples à courant constant.

De l'influence de la température des lames de platine servant à conduire les courants électro-chimiques.

Pour bien se rendre compte des effets électriques qui ont lieu dans la réaction des dissolutions les unes sur les autres, il faut tenir compte de ceux produits quand on chauffe une lame de platine qui plonge dans une dissolution neutre, acide ou alcaline. On conçoit que la lame échauffée introduite dans le liquide élève la température de la couche de liquide en contact avec elle, de sorte qu'il y a réaction de cette couche sur le liquide ambiant et courant électrique qui peut être dans le même sens ou en sens inverse de celui que l'on veut obtenir. Pour résoudre cette question, il faut savoir ce qui se passe dans la réaction d'un liquide chaud sur un liquide froid. Pour cela, on prend deux capsules contenant, l'une un liquide chaud, l'autre un liquide froid. On plonge, dans chacune d'elles, une lame de platine communiquant avec un multiplicateur, et on établit la communication entre les deux capsules avec une mèche de coton. Voici ce que l'expérience donne : quand de l'eau ou une solution alcaline chaude réagit sur de l'eau ou une solution alcaline froide, celle-ci prend l'électricité positive, et le liquide échauffé l'électricité contraire. Une solution acide chaude et une solution froide produisent des effets contraires, c'est-à-dire que le liquide chaud prend l'électricité positive. Nous devons ajouter encore que les effets électriques sont inverses pendant le refroidissement. Les expériences dont on vient de rendre compte peuvent être faites avec un multiplicateur à fil long destiné à reconnaître les effets électro-chimiques, et qui ne peut servir à transmettre que difficilement les courants thermo-élec-

triques; par conséquent on doit en conclure que, dans le mélange d'une solution chaude avec une solution froide, il s'opère un phénomène chimique analogue aux combinaisons, sous le rapport des effets électriques; le mélange de l'eau chaude avec l'eau froide donne donc réellement lieu à une actionchimique.

On conçoit, d'après cela, que, lorsqu'un liquide réagit vivement sur un métal, non-seulement il y a effet électrique résultant de l'action chimique, mais la couche de liquide adhérente s'échauffant si l'action est vive, il doit y avoir réaction du liquide chauffé sur le liquide environnant. Dans l'analyse des effets électriques, on doit donc en tenir compte.

Réflexions sur la théorie du contact.

Les effets électriques produits au contact des solides et des liquides ont une telle importance en électro-chimie, puisqu'ils servent de base à cette nouvelle branche des sciences physico-chimiques, que l'on ne saurait les étudier avec trop de soin. Volta crut pouvoir les expliquer en admettant l'existence d'une force électro-motrice, dont l'action était telle, suivant lui, que deux corps conducteurs en contact se constituaient dans deux états électriques différents par le seul fait du contact. Fabroni nia l'existence de cette force et attribua une origine chimique aux effets de contact; ces deux opinions ont été tour à tour combattues, défendues et modifiées par Wollaston, Davy, et autres physiciens; mais ce n'est réellement que lorsque l'on eut analysé les effets électriques produits, soit dans les actions chimiques, soit dans les phénomènes moléculaires, que l'on fut obligé d'admettre l'influence directe des réactions chimiques sur la production des effets électriques de contact, ou bien l'action de la chaleur ou d'une cause mécanique quelconque pouvant troubler l'équilibre naturel des molécules. Les effets de contact de Volta peuvent bien avoir lieu quand les affinités s'exercent, entre deux corps en contact, avant que la combinaison s'effectue; mais ces effets, dont nous ne nions pas entièrement l'existence, disparaissent vis-à-vis de ceux que nous venons de mentionner.

Les partisans de la théorie de Volta, n'envisageant la question que sous un seul point de vue, ne peuvent expliquer que très-peu des faits nombreux que l'on découvre chaque jour, et qui, en raison de leur nombre et de leur singularité, débordent de toutes parts le cadre dans lequel on cherche à les renfermer. Cette théorie a le seul avantage de fournir à l'analyse mathématique un principe simple, à

l'aide duquel on peut déduire de formules renfermant des constantes arbitraires, dans quelques cas particuliers, les résultats de l'expérience. C'est un des motifs qui ont contribué à la maintenir dans la science. Au surplus, en discutant sur un principe sans apporter à l'appui de son opinion d'autres faits que ceux connus, ou analogues, la science n'avance pas et chacun reste avec son opinion. Si l'on n'eût pas cherché à démontrer l'insuffisance de la théorie de Volta, comme l'a fait M. de la Rive et nous-même, pour expliquer une foule de faits nouveaux dans lesquels les réactions chimiques jouent le principal rôle, l'électro-chimie serait restée stationnaire. Nous n'avons nullement l'intention de discuter ici la théorie du contact, puisque nous n'aurions rien à ajouter à ce que nous avons dit à plusieurs reprises dans notre *Traité d'électricité* auquel nous renvoyons le lecteur. Cependant nous croyons nécessaire d'exposer les recherches récentes de M. Faraday, qui ont eu pour but de montrer que le contact, non suivi d'effets chimiques, était insuffisant pour produire des effets électriques.

M. Faraday a employé des liquides n'exerçant aucune action chimique, afin de voir ce qui arrivait en excluant cette cause de dégagement d'électricité. Ces liquides seulement avaient la faculté de conduire un courant électrique provenant d'un seul couple bismuth et antimoine. Voici quelques-uns de ses résultats :

1° Sulfure de potassium, en solution étendue, dans laquelle plongeaient deux lames de platine en relation avec un couple thermo-électrique et un multiplicateur, le tout formant un circuit fermé. A température égale dans toutes les parties de ce circuit, il n'y avait point production de courant ; mais en chauffant ou refroidissant les points de jonction bismuth et antimoine, l'aiguille aimantée déviait quelquefois jusqu'à 80°. En substituant d'autres couples thermo électriques au couple bismuth et antimoine, les mêmes effets avaient lieu ; seulement ils étaient moins marqués.

2° En substituant l'acide nitreux anhydre à la solution de sulfure de potassium, le courant thermo-électrique ne fut pas transmis ; mais cet acide, étendu de son volume d'eau, devenait assez bon conducteur pour livrer passage au courant thermo-électrique.

3° L'acide nitrique, privé d'acide nitreux, conduisait mal ; l'acide jaune paille était meilleur conducteur, et l'acide rouge pouvait être considéré comme bon conducteur. Ainsi, l'acide nitrique pur devait donc être un mauvais conducteur pour les courants thermo-électriques.

4° L'acide sulfurique ordinaire conduisait mal le courant électrique; tandis que, mélangé à deux volumes d'eau, il devenait meilleur conducteur que les deux premiers liquides.

Enfin, une solution concentrée de potasse ne conduisait que très-faiblement.

En essayant le pouvoir conducteur de différents corps solides pour les courants thermo-électriques, M. Faraday a reconnu que la galène, le bisulfure de fer, les pyrites arsenicales, le double sulfure de cuivre et de fer, le sulfure de cuivre naturel, les sulfures de bismuth, de fer et de cuivre, les globules d'oxyde de fer brûlé, l'oxyde des batitures, etc., conduisaient très-bien le courant, tandis que les peroxydes de manganèse et de plomb ne le conduisaient que médiocrement, et que le sulfure d'étain gris artificiel, la blende, le cinabre, l'hématite, le fer oligiste, l'oxyde de fer magnétique, l'oxyde d'étain natif, le wolfram, le peroxyde de cuivre, le peroxyde de mercure ne le conduisaient nullement.

Des circuits mixtes formés avec tous ces corps liquides ou solides n'ont jamais donné de courant quand la température était la même dans toutes les parties du circuit, bien que les courants thermo-électriques, qui sont les plus faibles que nous connaissions, traversassent chacun d'eux. M. Faraday a recherché ensuite ce qui se passait dans les circuits mixtes, en suivant la même marche que nous avions adoptée, il y a plus de dix-huit ans, quand nous avons opéré avec un circuit fermé, composé de deux fils d'or et d'acide nitrique ou hydrochlorique; les résultats de l'expérience ayant été rapportés page 412, nous n'y reviendrons pas. M. Faraday a indiqué plusieurs autres exemples de circuits mixtes inactifs qu'il est bon de connaître : 1° il s'est servi d'un circuit formé d'une solution de sulfure de potassium, d'une lame de fer et d'une lame de platine en contact; la dissolution a été placée dans deux verres où plongeaient deux lames de platine en relation avec le multiplicateur, et les deux verres communiquaient ensemble au moyen du couple métallique. Toutes les fois que le circuit était fermé, l'aiguille restait à zéro, ce qui annonçait évidemment qu'il n'y avait pas production d'électricité au contact du fer et du platine, car s'il y en eût eu, elle aurait passé avec facilité, attendu que le courant thermo-électrique qui avait lieu quand on appliquait la chaleur au point de jonction fer et platine, traversait le liquide de manière à faire dévier l'aiguille de 30° à 50°, bien entendu que l'effet négatif ne se manifestait que lorsque les surfaces métalliques étaient très-propres, et que l'on s'était mis en garde contre les causes capa-

bles de faire naître des effets secondaires. En substituant au fer le nickel, le palladium, l'or, etc., on obtint les mêmes résultats.

Les expériences ont également été faites avec la solution de sulfure de potassium, le platine et des substances minérales telles que la galène, les pyrites, et les effets ont été constamment négatifs; il est donc bien prouvé par les faits précédents, qui sont identiques avec ceux que nous avons fait connaître depuis longtemps, que toutes les fois qu'il n'y a pas réaction chimique des liquides sur les solides, il y a absence d'effets électriques. Passons au cas où le contact est suivi d'action chimique. Les faits observés par M. Faraday donneront plus de force encore à l'origine chimique de l'électricité voltaïque. Le liquide actif était encore du sulfure de potassium, et les métaux, des fils de platine, d'or, de fer, de plomb et d'étain; deux de ces fils successivement en communication avec un multiplicateur, furent plongés dans la solution de sulfure; avec l'étain et le platine, courant énergique du premier au deuxième à travers la solution. Le courant diminua rapidement d'intensité; dix minutes après, l'aiguille était revenue presque à zéro. Dans cet état, le circuit ne pouvait livrer passage à un courant thermo-électrique provenant d'un couple antimoine et bismuth. Cet effet négatif provenait de la présence sur l'étain d'un sulfure insoluble non conducteur.

Plomb et platine. — En substituant le plomb à l'étain, forte déviation, diminution rapide, puis, peu d'instants après, l'aiguille revient à zéro, et cependant un faible courant thermo-électrique pouvait circuler, attendu que le sulfure de plomb est conducteur; seulement, la présence de ce composé arrêtait l'action chimique, et par suite détruisait la cause qui dégageait de l'électricité. En combinant le plomb avec d'autres métaux, on obtenait des effets absolument semblables.

Dès l'instant que l'on admet que l'action chimique est la cause productive du courant, il est convenable de rechercher si les contacts métalliques restant les mêmes, les causes qui font varier l'action chimique n'influent pas également sur l'intensité du courant. Déjà M. de la Rive avait appris par ses expériences que l'accroissement d'action d'un couple métallique plongé dans un liquide chaud, était dû en grande partie à l'exaltation de l'action chimique. Pour dissiper tous les doutes sur l'origine chimique des effets électriques attribués au contact, M. Faraday a opéré seulement avec un métal et un liquide, de telle sorte que le circuit ne fût composé que d'un liquide chaud, d'un liquide froid et d'un métal; expérience que nous avions déjà faite

depuis longtemps, mais non avec autant de détails. L'appareil se composait d'un tube de verre recourbé, de 135 millimètres de long et de 7 millimètres de diamètre, placé sur un support, de manière à chauffer à volonté une des deux branches dans chacune desquelles plongeait une lame de métal en communication avec un galvanomètre ou avec un couple antimoine et bismuth.

Nous passons sous silence les effets obtenus avec un seul métal, attendu qu'ils n'offrent rien de particulier, et qu'ils rentrent complétement dans ce qui a été dit précédemment; mais nous prendrons le cas où les deux métaux sont différents, et d'où résultent des effets plus complexes. Supposons qu'on ait eu pour liquide de l'acide sulfurique étendu, et pour métaux, un fil d'argent et un fil de platine, on a obtenu une déviation de 4° dans une direction telle, que l'argent prenait au liquide l'électricité négative, ce qui annonçait une légère action chimique sur le métal. En chauffant l'eau acidulée autour du platine, la déviation fut portée à 30° dans le même sens. En chauffant autour du fil d'argent, il devint plus négatif; mais l'aiguille ne fut déviée que de 10°. Dans le premier cas, l'effet électrique résultant de la réaction du liquide chaud sur le *liquide froid*, a dû augmenter l'intensité du courant; tandis que dans le deuxième, le liquide chaud réagissant sur l'argent avec plus de force que le liquide froid, le courant électrique qui en a résulté, a dû l'emporter sur celui provenant de la réaction du liquide chaud sur le liquide froid produisant un courant en sens inverse.

Les exemples nombreux que nous avons cités dans ce chapitre ne doivent laisser aucun doute dans les esprits sur l'inefficacité du contact des solides et des liquides pour dégager de l'électricité toutes les fois que ce contact n'est pas suivi d'une action chimique, calorifique ou mécanique. Apporter de nouvelles preuves à celles que nous avons présentées jusqu'ici n'aurait aucun but. Nous allons continuer l'examen des effets électriques produits dans les actions chimiques, afin de bien connaître les lois qui les régissent, et de pouvoir construire des appareils électro-chimiques simples fournissant des courants constants pendant un temps plus ou moins long.

Des effets électriques produits dans les décompositions chimiques.

Il a été établi que, dans la combinaison d'un acide avec un alcali, le premier laisse dégager de l'électricité positive, le second de l'électricité négative. Dans les décompositions chimiques, les effets sont inver-

ses. Pour observer ces effets, on procède de la manière suivante : on place sur un disque de métal, fixé à l'un des bouts d'une tige horizontale soudée au plateau inférieur d'un condensateur, un creuset de platine préalablement chauffé au rouge, ou bien que l'on échauffe avec de fortes lentilles, dans lequel on verse le liquide sur lequel on veut opérer. A la place de la capsule, on se sert avec plus d'avantage de lames épaisses de platine qui conservent plus longtemps la chaleur qu'on leur communique. Si l'on jette quelques gouttes d'eau distillée, on n'obtient aucun signe d'électricité ; par conséquent l'évaporation seule n'est pas une cause du dégagement de cet agent. Quand l'eau renferme de la strontiane ou d'autres bases, la capsule se charge d'un excès d'électricité positive, et la vapeur prend l'électricité négative. Cet effet n'a lieu néanmoins qu'à l'instant où l'eau de combinaison s'échappe. Les effets sont inverses avec l'ammoniaque étendue d'eau. Dans cette dernière expérience, l'ammoniaque se vaporisant plus facilement que l'eau, emporte avec elle l'électricité positive, et laisse à l'eau, et par suite à la capsule, l'électricité négative. Dès lors, les effets sont inverses de ceux qui ont lieu dans les combinaisons. Quand l'eau renferme un acide et que l'acide s'évapore, il emporte avec lui l'électricité négative ; effet également inverse de celui que l'on obtient dans les combinaisons chimiques. Pour bien voir les effets électriques produits dans les décompositions, on opère avec le bicarbonate de soude que l'on projette dans la capsule rougie ; ce sel se décompose en laissant échapper de l'acide carbonique. La capsule possède un fort excès d'électricité positive, tandis que l'acide emporte avec lui l'électricité négative. Si l'on remplace le bicarbonate par du sel marin, le sel décrépite, l'eau de cristallisation emporte avec elle l'électricité positive.

M. Peltier a précisé une circonstance indispensable pour la production du phénomène que nous devons signaler. Si l'on verse quelques gouttes d'eau sur un morceau épais de platine, légèrement bombé, et dont on a élevé la température au moyen d'une lampe, il s'opère différents effets connus des physiciens relativement à la forme et au mouvement de l'eau. Nous dirons qu'après diverses évolutions, elle finit par mouiller le platine, s'aplatit, et se vaporise sans qu'il y ait d'électricité produite si l'eau est parfaitement pure, et que le morceau de platine soit très-propre. Avec une dissolution peu étendue de sel marin, l'effet est le même la première fois ; mais le sel abandonné par l'eau forme alors une couche légère sur le platine ; si l'on ajoute une nouvelle quantité d'eau, cette couche est reprise par celle-ci ; dès l'ins-

tant que la goutte est diminuée de volume par suite de l'évaporation, elle devient presque opaque, et l'on voit une multitude de petits filets cristallins s'agiter dans l'intérieur. Bientôt après on entend de petites décrépitations accompagnées de projections salines. Le vase devient alors négatif; mais si la température est assez abaissée pour permettre le mouillage, la décrépitation cesse, la goutte s'étend, l'eau se transforme en vapeur, et l'électricité s'échappe avec celle-ci. L'effet augmente à mesure que la couche saline est plus épaisse, et il est en rapport avec la décrépitation. Le sel qui décrépite sans fusion aqueuse produit le même effet.

Si l'on opère avec le nitrate d'ammoniaque, il y a fusion aqueuse, évaporation sans production d'électricité, puis décrépitation et dégagement d'électricité. Dans les expériences de M. Peltier, il y a production d'électricité lors de la séparation des molécules d'eau combinées; elle s'est donc manifestée pendant la décomposition chimique. Cette observation rentre à la vérité jusqu'à un certain point dans la manière de voir de M. Pouillet, puisqu'il n'y a pas émission d'électricité pendant l'évaporation de l'eau distillée dans un vase parfaitement décapé. C'est un fait qui est aujourd'hui acquis à la science; mais relativement aux effets électriques produits dans les décompositions, il y a une différence dans la manière de voir de ces deux physiciens; seulement, comme les effets sont constants dans l'un et l'autre cas, il faut admettre que la décrépitation, autrement dit la séparation de l'eau combinée, donne le maximum d'effets.

Nous sommes naturellement amené à parler du dégagement de l'électricité dans l'expansion de la vapeur des chaudières des locomotives.

Du dégagement de l'électricité dans l'expansion de la vapeur des chaudières à vapeur.

On a observé, dans ces derniers temps, un dégagement considérable d'électricité dans le jet de vapeur d'une chaudière; fait remarquable en raison de l'intensité de ses effets et des circonstances dans lesquelles il est produit. Ce fait, observé la première fois par M. H.-E. Armstrong (*Philos. Mag.*, nov. 1840), dans l'usine de Sighilles, près de New-Castle, a été depuis l'objet d'investigations de la part de plusieurs personnes. La chaudière à vapeur qui a servi à l'observation n'offrait rien de particulier dans sa construction; seulement, à la partie inférieure de la soupape se trouvait une rondelle

fixée par des boulons. Cette soupape était séparée de la paroi de la chaudière par un ciment composé de craie, d'huile et d'étoupes, afin qu'elle joignît aussi bien que possible. Une fissure s'étant faite dans ce ciment, un jet de vapeur s'en échappa, tellement électrisé, qu'en plongeant une des mains dedans et appuyant l'autre sur le levier de la soupape, on voyait passer une étincelle brillante chaque fois que l'on interrompait la communication. On ressentait une violente commotion dans le bras. Ces effets étaient les mêmes, quel que fût le point de la chaudière que l'on touchât. Celle-ci ayant été nettoyée quelque temps après, l'on trouva une forte incrustation de calcaire, qui fut enlevée; on fit fonctionner la chaudière, et les effets électriques furent moins marqués, quoique encore assez sensibles pour produire une étincelle distincte et un choc dans le bras. Il fut prouvé par là que la présence de l'incrustation était une des causes, non pas peut-être indispensables à la production du phénomène, mais du moins nécessaires pour en augmenter l'intensité.

Dès l'instant que ce fait fut connu, on répéta de toutes parts l'expérience de M. Armstrong, et ce dernier lui-même en varia toutes les circonstances pour tâcher de remonter à la cause. Avant de chercher à expliquer le phénomène, commençons d'abord par l'exposition de tous les faits. On reconnut d'abord qu'en se plaçant sur un tabouret isolant, les étincelles acquéraient, ainsi que la commotion, une plus forte intensité. La vapeur était positive, la chaudière retenait donc l'électricité négative. On chargea une bouteille de Leyde, qui donna de fortes secousses à plusieurs personnes formant chaîne. La quantité d'électricité émise par le jet de vapeur augmentait ou diminuait avec la charge de la soupape.

L'expérience ayant été répétée avec le jet de vapeur d'une chaudière d'une machine à haute pression et alimentée par de l'eau pure, les effets furent nuls; d'après cela, la formation ou la présence d'une incrustation dans la chaudière paraissait, dans ce cas, une condition indispensable à la production du phénomène, que l'on doit étudier avec d'autant plus d'intérêt, qu'il paraît avoir de l'analogie avec les effets électriques qui accompagnent ordinairement les trombes et les orages.

M. Armstrong recommença ses expériences en se servant de la chaudière d'une locomotive, et opérant presque toujours la nuit, afin que les effets lumineux fussent plus visibles. Il se plaça sur un tabouret isolant, et tint d'une main une tige de fer placée immédiatement au-dessus de la soupape, lorsque la vapeur s'échappait, et approcha l'autre main d'un conducteur en rapport avec la chaudière; il obtint des

étincelles d'un pouce anglais de longueur; en élevant la tige au-dessus de la soupape, mais la laissant toujours dans la vapeur, il arrivait à un point où les étincelles avaient deux pouces de longueur. L'effet lui parut proportionnel à la quantité de vapeur qui s'échappait par la soupape. Il n'avait cependant encore fait aucune expérience rigoureuse pour s'assurer jusqu'à quel point cette loi était exacte. La soupape ayant été ouverte brusquement, les bords du levier et de la rondelle devinrent lumineux.

M. Pattinson (*Phil. Mag.*, nov. 1840) répéta l'expérience qu'on vient de décrire, en précisant bien les circonstances de la production du phénomène. La vapeur sortait d'abord d'une soupape qui se trouvait sous la pression de cinquante-deux livres par pouce : les étincelles avaient alors trois pouces de longueur. S'étant placé, comme M. Armstrong, sur un tabouret isolant, et le conducteur à pointe plongeant dans la vapeur, les étincelles étaient d'autant plus longues que la soupape restait fermée plus longtemps. Au bout d'une ou deux minutes de fermeture, si on la soulevait brusquement, les étincelles avaient quatre pouces de longueur. La pression n'étant plus que de quarante livres par pouce, les étincelles devinrent plus petites, et les plus longues n'avaient pas plus de *trois pouces*; à vingt livres, elles n'avaient qu'un pouce; à dix livres, d'un quart à un demi-pouce; à cinq livres, elles étaient presque invisibles. Mais, à toutes ces pressions, les effets augmentaient toutes les fois qu'on laissait la soupape fermée pendant quelque temps. Il en fut de même quand la chaudière fut isolée avec des pièces de bois séché.

M. Pattinson tira la conséquence de la série de ses expériences, que l'électricité paraissait se produire à l'instant où l'eau entrait en vapeur, celle-ci prenant l'électricité positive, l'eau et la chaudière l'électricité négative; déduction qui ne saurait être admise d'après les expériences de M. Pouillet, précédemment rapportées; il remarqua de plus, que la vapeur humide produisait peu d'électricité. Les effets les plus énergiques observés jusqu'ici ont été produits dans des chaudières échauffées par des tubes en cuivre.

Pour mieux éclairer la question, M. Armstrong, qui avait découvert le fait fondamental, reprit les expériences, dans l'espoir de trouver la cause et les lois du phénomène; mais ses tentatives n'eurent pas le succès qu'il espérait (*Phil. Mag.*, janv. 1841). Il en résulte, suivant lui, contrairement à ce qui a été dit, qu'un jet de vapeur à haute pression n'est guère plus électrique qu'un jet de vapeur à basse pression; seulement l'électricité fournie par la première est plus facile

à recueillir; en isolant la chaudière, la quantité d'électricité positive diminue. Voici la nouvelle série d'expériences qui furent faites :

Un robinet adapté à la chaudière ayant été surmonté d'un tube de verre, on aperçut des étincelles briller le long du tube quand on ouvrait le robinet; ces étincelles se remarquaient depuis le nuage formé par la vapeur en dehors jusqu'au robinet, et cela que la chaudière fût isolée ou non. Les parois du tube n'étaient pas humides.

M. Armstrong tira la conséquence de la transmission de l'électricité du jet au robinet, que l'électricité positive de la vapeur ne se développe que lorsque celle-ci devient visible. Il nous semble que cette conséquence ne s'accorde pas avec le fait précédemment rapporté, savoir, que la lueur électrique est visible autour de la soupape. Il est certain que si les étincelles commencent à se montrer dans le tube, à partir du bout supérieur, en se succédant jusqu'au robinet, le fait est à prendre en considération dans l'explication du phénomène; mais, pour l'instant, ne nous en occupons pas, et continuons l'examen des faits, afin d'avoir les documents nécessaires à cette explication.

M. Schafthœutl a fait des recherches sur le même sujet (*Phil. Mag.*, févr. 1841), mais en se servant d'un appareil à la portée de tous les physiciens. Il prit une sphère en fer creux, de cinq pouces anglais de diamètre, contenant du mercure dans lequel plongeait un tube servant de manomètre, et au-dessus de l'eau distillée. Dans l'intérieur de cette sphère plongeait un thermomètre dont la tige traversait la surface de la sphère. La couche d'eau distillée qui se trouvait sur le mercure avait un pouce un quart d'épaisseur (mesure anglaise). Dans la direction du jet de la vapeur, à une distance de neuf pouces environ de l'orifice du robinet, se trouvait une cloche en verre, de neuf pouces de diamètre et de cinq pouces de hauteur, dans laquelle aboutissaient les extrémités de deux fils de cuivre communiquant avec un fil unique du même métal. Quand l'eau fut entrée en ébullition, et que le manomètre indiqua un excès de pression de 31 pouces anglais, le robinet fut ouvert : la vapeur se précipita dans la cloche, s'y condensa, et fournit assez d'électricité en quelques secondes pour faire diverger les feuilles d'or d'un électroscope condensateur, en relation avec un fil de cuivre. Il en fut de même quand la pression en excès était de 23 pouces. L'eau distillée qui avait servi à l'expérience avait pris une teinte rougeâtre due à la présence du peroxyde de fer; elle fut remplacée par une dissolution de sel marin, puis ensuite par de l'eau distillée, et alors on ne recueillit point d'électricité. Cette expé-

rience fut répétée plusieurs fois avec de l'eau distillée, en nettoyant bien la surface intérieure, et toujours les effets furent négatifs; on n'en obtint que lorsque l'on mit exactement dans la sphère la même quantité d'eau qui avait servi dans la première expérience. M. Schafthœutl crut devoir en tirer la conséquence que l'effet devait être attribué à l'eau très-divisée que la vapeur entraînait avec elle et qui se condensait sur les parois de la cloche de verre. Un bruit particulier produit par le jet de vapeur était l'indice du phénomène.

Cet observateur alla plus loin : il avança qu'il ne suffisait pas, pour que l'effet eût lieu, que la vapeur se condensât sous forme de brouillard, mais qu'il était nécessaire qu'elle devînt liquide. L'expérience, suivant lui, réussit également bien quand l'eau renfermait du sel marin ou du sulfate de chaux, pourvu que la quantité de liquide fût convenable. Il attribua uniquement l'électricité dégagée à la condensation soudaine de la vapeur et à la séparation de l'eau formée, la vapeur condensée prenant l'électricité positive, et la négative restant à la chaudière. A quelques modifications près, c'est la manière de voir de plusieurs physiciens anglais.

Les expériences précédentes ne paraissant pas encore suffisantes à M. Armstrong pour expliquer le phénomène, il reprit cette question, et fit de nouvelles expériences dont plusieurs sont intéressantes.

Il condensa de l'air, sous une pression de 8 atmosphères, dans un vase à parois très-résistantes, de la contenance d'un peu moins de sept litres, et muni d'un tube de verre par lequel l'air devait s'échapper : le vase fut placé sur un isoloir. Ayant tourné le robinet pour laisser échapper l'air, il n'obtint, la première fois, aucun résultat. Dans une seconde expérience, le verre devint si fortement négatif, qu'il put en tirer des étincelles de 1/4 de pouce de long. Cette expérience fut répétée souvent avec le même succès. L'électricité du vase, quoique ordinairement négative, comme avec la vapeur, était cependant quelquefois positive; aussi devait-il se présenter des cas où il n'y avait aucun dégagement d'électricité, quand le vase passait de l'état négatif à l'état positif. L'expérience réussissait mieux par un temps froid et légèrement humide que lorsqu'il était sec et chaud. Cette circonstance est à noter, car elle semblerait faire croire que la présence de l'eau dans l'air soit une des causes de la production du phénomène; aussi cette conjecture n'a-t-elle pas échappé à M. Armstrong.

Dans l'expérience précédente, il paraîtrait que l'influence de la présence de l'eau en vapeur est telle, que lorsque le récipient est

parfaitement sec et échauffé, jusqu'à ce qu'on ne puisse y tenir la main, la sortie de l'air ne produit pas d'électricité. Si l'intérieur du récipient est humide, on ne peut faire disparaître les signes d'électricité qu'en élevant davantage la température; quand celle-ci est basse, la présence de l'eau contribue peu aux effets électriques. En effet, M. Armstrong ayant desséché complétement l'intérieur d'un récipient, y introduisit une certaine quantité de potasse pour enlever à l'air condensé l'eau qu'il contenait; puis il comprima de nouveau de l'air, et plaça l'appareil dans un endroit froid pendant douze heures, afin que la potasse eût le temps de produire son effet. L'expérience ayant été faite ensuite, les effets furent les mêmes, comme si l'on n'avait pris aucune précaution pour enlever l'humidité.

Les expériences furent recommencées avec une chaudière de trente pouces de long et quatre pouces de large (mesure anglaise), le couvercle ayant une soupape de sûreté graduée. Le fourneau était porté sur quatre pieds de verre; un tube de cuivre partait du couvercle de la chaudière, entrait dans le fourneau, y serpentait plusieurs fois, en sortait latéralement, et son extrémité était terminée par un robinet au moyen duquel on donnait issue à la vapeur qui se desséchait en passant dans le tube chaud. Cet appareil a donné des effets assez considérables, et a permis de reconnaître les circonstances dans lesquelles la chaudière était tantôt positive, tantôt négative.

Les expériences faites à cet égard portent à croire que l'état calorifique de la portion de la chaudière en contact avec la vapeur, est probablement une des causes des effets produits : car, suivant M. Armstrong, la construction du fourneau permet, en fermant sa porte latérale, d'opérer un grand accroissement de température au haut de la chaudière où se trouve la vapeur; et alors, presque toujours, l'électricité négative de la chaudière, et la positive de la vapeur, diminuent et disparaissent entièrement; puis la positive paraît dans la chaudière, et la négative dans le jet de vapeur. La diminution de l'eau favoriserait aussi l'accumulation de la chaleur dans le haut de la chaudière, et cette circonstance est très-propre aux changements des électricités. Nous croyons cependant qu'il y a d'autres causes qui déterminent les variations des signes électriques, entre autres l'état électrique du tube, qui, étant le même que celui de la chaudière, doit produire des recompositions continuelles d'électricité.

Voyons comment influe la pression sur la production du phénomène.

Pour déterminer l'intensité comparative de l'électricité dégagée par la vapeur à divers degrés de pression, on s'est arrangé pour

qu'il sortît en même temps des poids égaux de vapeur; et pour cela, on diminua l'ouverture par laquelle sortait la décharge, dans la même proportion que la pression augmentait, et réciproquement. La soupape de sûreté remplissait ce but. Il fallait encore, pour que les résultats fussent comparables, que la vapeur fût toujours dans le même état de sécheresse : ce que l'on obtenait en modérant le feu de manière à obtenir cet effet. On enleva d'abord la soupape pour laisser sortir librement la vapeur; il n'y eut aucun des effets précédemment décrits. La soupape, remise en place et sous la pression d'un peu plus d'une livre par pouce carré, les lames d'or d'un électroscope convenablement placé commencèrent à donner des signes d'électricité dus à la cause que l'on étudiait. Dans cet état, en augmentant très-peu la pression, les effets électriques devinrent plus considérables; car à la pression de trois livres par pouce carré, on tirait cinq à six petites étincelles par minute. En augmentant ensuite la pression, l'accroissement des effets électriques était moins rapide qu'auparavant. C'est ainsi que l'électricité obtenue sous la pression de trois pouces n'était doublée que lorsque la pression était de quinze livres; elle était triplée à cinquante livres, quadruplée à cent vingt; et à deux cent cinquante livres, l'électricité n'était seulement que cinq fois plus forte qu'à trois livres.

On ne peut rien inférer de ces résultats, relativement à l'effet de la pression, attendu que les causes qui font changer d'électricité à la chaudière, ont dû bien certainement intervenir.

Voici encore quelques faits généraux qui doivent être signalés :

1° Une augmentation considérable de pression produit toujours dans la chaudière, qui est d'abord positive, un retour temporaire à l'électricité négative, lequel dure une ou deux minutes, puis la chaudière reprend ensuite son état positif.

2° Lorsque la pression est considérable, la tendance négative du jet de vapeur est fortement augmentée par le passage de la vapeur à travers un tube de cuivre, à tel point que l'on peut obtenir souvent du tube un jet de vapeur négatif, tandis qu'on en reçoit un autre positif de la soupape. A de basses pressions, le passage de la vapeur à travers le tube produit plutôt un effet inverse.

3° Les effets les plus énergiques sont produits lorsqu'on décharge la vapeur à travers un tube de verre court fixé à la chaudière; si le tube est long, il y a diminution dans les effets. L'électricité est, en général, plus faible quand la chaudière est positive et le jet négatif que lorsque l'une et l'autre sont dans un état contraire.

Pour savoir jusqu'à quel point l'électricité provenait de l'expansion de la vapeur, M. Armstrong a fait l'expérience suivante : il a fixé un cylindre métallique au robinet latéral qui terminait son tube de cuivre ; ce cylindre a été maintenu suffisamment chaud pour empêcher toute condensation de vapeur au dedans ; son extrémité supérieure était percée de petites ouvertures par lesquelles s'échappait la vapeur. Il n'y eut aucune diminution dans l'électricité. Cette expérience prouve donc que l'expansion de la vapeur n'est pas la cause du développement de l'électricité ; M. Armstrong l'attribue à la précipitation de la vapeur.

Suivant une autre expérience, l'électricité produite dans le vase évaporatoire par l'émission de la vapeur est indépendante de l'évaporation concomitante. Dans ce cas, l'eau avait été chassée de la chaudière, et cependant cette électricité était toujours positive. Les circonstances suivantes devront être appréciées dans la théorie que l'on essayera de donner du phénomène.

Il paraît que la tendance du nuage de vapeur à donner de l'électricité négative au lieu d'électricité positive augmente à mesure que l'on se sert plus longtemps de l'appareil, jusqu'à ce qu'enfin l'électricité positive ne paraisse plus que rarement dans le jet.

Pensant que l'état négatif du nuage provenait de l'oxydation du métal, on examina l'intérieur de la chaudière, et on trouva la paroi intacte. L'état négatif fut le même après qu'on l'eut lavée avec de l'eau ; mais avec une solution de potasse, le jet devint positif.

Dans les expériences subséquentes, ayant ajouté une petite quantité de potasse à l'eau qui engendrait la vapeur, l'intensité de l'électricité augmenta à un point tel qu'il obtint plus de trente étincelles d'un demi-pouce de longueur pendant une minute ; avec la soude, l'effet était semblable, mais à un degré moindre. En y substituant une petite quantité d'acide nitrique, la vapeur devint négative ; les acides sulfurique et hydrochlorique ne parurent pas exercer une grande influence, même lorsque la chaudière renfermait de la limaille de fer sur laquelle ces acides devaient agir. La chaux rendit la vapeur positive ; le nitrate de cuivre agit à peu près comme l'acide nitrique. Enfin, les effets puissants obtenus quand l'eau contenait de la potasse, ont fait penser que l'on pourrait remplacer les machines électriques ordinaires par des appareils vaporo-électriques.

Tels sont les faits qui ont été exposés jusqu'ici relativement à l'électricité produite dans les chaudières des machines à vapeur quand

il sort un jet, soit par la soupape, soit par un robinet disposé à cet effet.

Quand on songe aux effets nombreux et souvent contradictoires, au peu d'expériences rigoureusement exactes, pour étudier le phénomène, de manière à en saisir les lois, on éprouve de grandes difficultés à expliquer d'une manière satisfaisante les nombreux effets observés. Nous allons cependant essayer de les rapporter aux causes connues du dégagement de l'électricité; car s'il existe une cause non encore étudiée, il faut avouer que la question n'est pas assez éclairée pour que l'on puisse, dans l'état actuel des choses, reconnaître quelle est réellement cette cause. Nous avons vu qu'il y avait dégagement d'électricité dans les actions chimiques, calorifiques, moléculaires et magnétiques; tels sont les jalons sur lesquels nous devons nous appuyer pour expliquer le phénomène de M. Armstrong. Le dégagement de l'électricité dans la formation de la vapeur a été longtemps un sujet de discussion entre les physiciens, attendu que l'expérience donnait des résultats tantôt dans un sens, tantôt dans un autre. En montrant que lorsqu'on faisait évaporer de l'eau distillée dans un vase de platine, et qu'en remplaçant cette eau successivement par de l'eau acidulée ou alcalisée, on avait des effets nuls ou des effets électriques dans deux sens différents, M. Pouillet a résolu la question; et il fut prouvé par là que le changement d'état de l'eau ne produisait pas d'électricité; que dans le deuxième cas la vapeur étant négative, et dans le troisième positive, ces effets devaient être attribués à une décomposition chimique, c'est-à-dire, à la séparation de l'eau d'avec l'acide ou l'alcali.

Pour réussir dans l'expérience de la chaudière à vapeur, il faut que l'eau renferme un sel quelconque et qu'il se forme un encroûtement, car l'effet est d'autant plus fort que celui-ci est plus considérable. Mais ce qui complique le phénomène, ce sont 1° les effets électriques complexes résultant d'abord de l'action chimique du liquide sur la fonte ou le métal dont se compose la chaudière; 2° de la séparation de l'eau des substances qu'elle tient en dissolution, et auxquelles il faut rattacher les effets qui accompagnent la décrépitation; 3° de l'électricité due à des phénomènes thermo-électriques dont la cause n'est pas encore bien connue, et qui, d'après les observations de M. Armstrong, interviennent pour faire changer de signe la chaudière qui, étant ordinairement négative, devient, dans quelques cas, positive. D'un autre côté, l'expérience qui a été faite avec de l'air comprimé humide vient compliquer singulièrement la question; car

dans ce cas on ne peut admettre une action chimique, puisque les effets électriques sont dus uniquement à la sortie de l'air comprimé par une ouverture étroite. Peut-être le frottement de l'air contre les parois métalliques est-il pour quelque chose dans la production du phénomène.

D'après cela, il n'est pas étonnant que l'on n'ait pas encore donné une explication satisfaisante des effets électriques produits lors de l'émission de la vapeur dans les chaudières des machines à haute et basse pression, lorsqu'on voit qu'il y a peut-être quatre causes connues qui concourent à l'effet général. On ne pourra avoir une explication complète que lorsqu'on connaîtra la part d'action de chacune de ces causes. Nous avons présenté avec d'assez grands développements les phénomènes électriques qui accompagnent l'émission de la vapeur des chaudières, en raison de la similitude de ces phénomènes avec d'autres analogues produits dans l'atmosphère.

Des effets électriques produits dans le contact des gaz et des métaux non oxydables.

Lorsqu'une lame de métal plonge dans un liquide capable de réagir chimiquement sur elle, il y a un dégagement d'électricité dont on a donné les lois : ce dégagement est nul si la lame n'est pas attaquée, à moins qu'elle ne soit recouverte de substances solides ou gazeuses capables de réagir chimiquement sur le liquide. Nous avons étudié ce qui arrivait avec des substances solides ; il nous reste à montrer comment se comportent les gaz.

Quand on décompose de l'eau distillée avec deux lames de platine plongeant dedans et communiquant avec une pile voltaïque, et que l'on interrompt la communication au bout de quelques instants, et qu'ayant détaché les deux lames des extrémités de la pile on les réunisse avec un fil en relation avec un multiplicateur, on a un courant dirigé en sens inverse du premier, c'est-à-dire que la lame qui primitivement était le pôle positif devient le pôle négatif et réciproquement ; cet effet se reproduit encore en opérant avec un seul couple. Voici l'explication que nous avons donnée depuis longtemps de ce phénomène :

Quand deux lames de platine plongeant dans une solution saline font partie d'un circuit voltaïque, la surface de la lame positive se recouvre d'éléments acides et d'oxygène, et la surface de la lame négative d'éléments alcalins et d'hydrogène. Les deux lames se

trouvent donc dans le même état que si la première avait été mise en contact avec une solution acide, et que l'autre plongeât dans une solution alcaline; dans les deux cas, les effets sont les mêmes. Nous avions fait l'expérience en mettant une lame dans une solution de potasse, et l'autre dans de l'acide nitrique; M. Matteucci l'a faite également en mettant en contact pendant quelque temps les lames avec du gaz hydrogène et du gaz oxygène; puis, les plongeant dans de l'eau distillée, il a obtenu des déviations considérables; la lame recouverte d'oxygène a pris à l'eau l'électricité positive; ces deux gaz, en réagissant sur l'eau, ont donc donné lieu à des effets électriques semblables à ceux que l'on aurait obtenus directement dans la combinaison de l'oxygène avec l'hydrogène. Les lames ont conservé pendant longtemps cette propriété. Il est nécessaire, pour la leur enlever au bout de plusieurs heures, de les faire rougir. L'azote se comporte, quand il adhère à une lame de platine, à l'égard de l'oxygène comme l'hydrogène, et relativement au dernier gaz comme l'oxygène. Lorsque les lames d'or ou de platine produisent des effets secondaires tels que ceux dont il s'agit, on dit que les lames sont polarisées. On doit se mettre en garde dans les expériences délicates contre cette polarisation, quand des lames sont restées longtemps en contact avec l'air, sans quoi on attribue à d'autres causes les effets dont il est question. Nous renvoyons pour plus amples renseignements à notre *Traité d'électricité*, tome V, deuxième partie, page 12.

Des appareils simples à courant constant.

Les connaissances que nous avons acquises sur les effets électriques produits dans les actions chimiques en général étaient indispensables pour concevoir la théorie des appareils électro-chimiques simples à courant constant, destinés à fonctionner pendant plus ou moins de temps, et celles relatives aux effets décomposants des courants électriques dont il ne pourra être question que dans le deuxième volume. Tant que l'on s'est borné à employer une lame de zinc et une lame de cuivre plongeant dans de l'eau acidulée et communiquant ensemble au moyen d'un fil métallique, on n'obtenait qu'un courant dont l'intensité diminuait rapidement, de sorte qu'en laissant continuer l'action, au bout d'un certain temps, il était incomparablement plus faible qu'en commençant. Pour parer à cet inconvénient, il faut disposer les appareils pour que l'action chimique soit toujours sensiblement

constante, et que les lames ne se polarisent pas de manière à produire un contre-courant qui viendrait détruire l'effet du premier. Nous allons décrire les appareils qui remplissent quelques-unes des conditions exigées.

Le premier appareil est composé de deux bocaux en verre, dont l'un renferme une solution de potasse caustique concentré, et l'autre de l'acide nitrique également concentré. Les deux vases communiquent ensemble par l'intermédiaire d'un tube de verre recourbé rempli de kaolin ou d'argile exempte de carbonate de chaux, et humectée d'une solution de sel marin. Dans le bocal où se trouve l'alcali plonge une lame d'or; dans l'autre, une lame de platine. Si l'on met en communication les deux lames au moyen de fils d'or ou de platine, on a un courant assez énergique provenant de la réaction de l'acide sur l'eau et le sel marin d'une part, de la potasse de l'autre, sur l'eau et le sel marin. La direction du courant montre que la lame plongée dans l'alcali prend l'électricité négative, et la lame plongée dans l'acide l'électricité positive; la permanence dans l'intensité du courant pendant plusieurs jours annonce que les surfaces des lames ne sont point polarisées; il est facile, en effet, de le prouver. Pendant que cet appareil fonctionne, le nitrate de potasse qui se forme à chaque instant est décomposé par l'action du courant; l'acide est transporté au pôle positif, qui est la lame plongeant dans la potasse, tandis que la potasse est transportée sur la lame négative qui plonge dans l'acide. Or, l'acide et l'alcali transportés, se trouvant en contact d'un côté avec la potasse, de l'autre avec un acide, se combinent immédiatement avec les liquides environnants, de sorte que les lames sont toujours parfaitement décapées; dès lors il ne peut y avoir aucun effet secondaire. Le courant ne diminue d'intensité que lorsque le nitrate de potasse qui se forme peu à peu cristallise en assez grande quantité dans le tube de communication pour interrompre la circulation du courant; dans ce cas, il faut changer l'argile, inconvénient que l'on évite en disposant l'appareil de la manière suivante : le tube intermédiaire est tubulé à la coudure; les deux extrémités du tube ne renferment qu'une petite quantité d'argile retenue au moyen d'une lame très-mince de platine, et percée de trous pour laisser passer le courant. Le reste du tube est rempli d'eau salée qu'on peut changer à volonté. On peut aussi introduire les deux bouts du tube recourbé, en les faisant moins longs, dans deux tubes de platine, afin de recueillir une plus grande quantité de l'électricité dégagée dans la réaction des liquides; mais alors il faut éviter qu'ils soient soudés à

l'or, attendu que l'eau régale qui se forme dans la réaction de l'acide nitrique sur le sel marin attaquerait ce métal.

On peut encore adopter une autre disposition qui présente des avantages dans les expériences en petit. On introduit de l'argile dans un tube de verre recourbé en U, d'un à deux décimètres de longueur et d'un centimètre d'ouverture, de manière à occuper plusieurs centimètres de la partie recourbée et humectée d'eau salée, mais de sorte qu'elle ne forme pas une pâte trop liquide. Au milieu de la coudure se trouve une petite ouverture ; dans l'une des branches on verse de l'acide nitrique, et dans l'autre une solution de potasse ; puis l'on plonge le tube dans un vase qui renferme de l'eau dont le niveau est le même que celui des autres liquides. On met ensuite des lames de platine dans l'acide et dans l'alcali ; l'eau est destinée à enlever le nitrate de potasse à mesure qu'il se forme. Cette disposition peut servir encore à former de petits couples à courant constant composés comme il sera dit ci-après.

L'appareil de M. Daniel présente aussi des avantages, attendu que la force en est plus grande, mais non la régularité d'action. Les principes sur lesquels repose sa construction sont ceux précédemment énoncés. Cet appareil a été modifié de diverses manières ; nous allons indiquer les dispositions le plus généralement adoptées. *ab* (fig. 10, pl. VI) est un cylindre de cuivre, creux et fermé aux deux bouts ; il est lesté avec du sable pour éviter sa flottaison dans le liquide ; à sa partie supérieure on soude une bande de cuivre de quelques centimètres, percée de trous et formant galerie, dans laquelle on place des morceaux de sulfate de cuivre ; le cylindre se met dans un sac en baudruche ou en toile à voile ; on l'entoure d'un cylindre de zinc amalgamé, et le tout plonge dans un bocal MN. Le diaphragme dans lequel se trouve le cylindre est rempli d'une dissolution saturée de sulfate de cuivre jusqu'à la hauteur de la galerie, de sorte que la dissolution étant en contact avec les cristaux de sulfate de cuivre se trouve toujours à l'état de saturation. Dans le bocal est une solution d'eau salée en quantité suffisante pour que les deux liquides soient de niveau. L'eau salée est préférable à l'eau acidulée, en ce qu'elle permet de faire fonctionner l'appareil plus longtemps, seulement la force est moindre. A la partie supérieure de chaque cylindre, cuivre et zinc, est soudé un appendice qui permet d'établir la communication avec les corps que l'on soumet à l'action d'un courant électrique. Dès l'instant que le circuit est fermé, il en résulte un courant par suite duquel le cylindre de zinc devient le pôle positif, et le cylindre de cuivre

le pôle négatif du couple; le sulfate de cuivre est décomposé, le cuivre se dépose sur le cylindre, dont la surface constamment brillante n'est point polarisée. Le zinc amalgamé, en raison de ses propriétés, est peu polarisé, de sorte que le courant change peu d'intensité. Quoique très-usuel, cet appareil a un inconvénient; on ne recueille que l'électricité dégagée dans la réaction du liquide sur l'une des faces du zinc. Mais on peut y remédier en formant le couple de la manière suivante : on dispose une auge en cuivre AB (fig. 11), munie de deux appendices creux *a b*, *a'*, *b'* en biseau, communiquant avec l'intérieur de l'auge par plusieurs ouvertures, et remplis de sulfate de cuivre. Une lame de zinc amalgamé MN est placée dans un sac de toile à voile ; en C et D sont soudés deux appendices. Dans l'auge AB, on verse une dissolution de sulfate de cuivre, et de l'eau salée dans le sac servant de diaphragme, puis le zinc et son diaphragme sont placés dans l'auge. En fermant le circuit, on a un courant très-énergique. Cet appareil permet de recueillir beaucoup plus de l'électricité dégagée, parce que chaque face de la lame de zinc est en présence d'une surface de cuivre. C'est donc la meilleure disposition que l'on puisse adopter. Si l'on veut donner plus de force à l'action voltaïque, suivant les effets que l'on se propose d'obtenir, on plonge le bocal dans de l'eau, dont on élève la température. A 60 ou 80°, la réaction de l'eau salée sur le zinc est telle que l'action décomposante du couple est énergique.

L'appareil suivant a de grands avantages. On emploie pour diaphragme un cylindre en terre demi-cuite, et que l'on remplit d'amalgame liquide de zinc dans lequel plonge une lame de platine fixée à un fil de même métal. Le cylindre est placé dans un bocal contenant une solution saturée de sulfate de cuivre, dans laquelle est un cylindre de cuivre entourant le diaphragme. En fermant le circuit, la réaction du sulfate de cuivre sur l'amalgame donne naissance à un courant dont on utilise l'action; des appareils à courant constant, celui-ci offre le plus d'avantages, car il peut fonctionner pendant un temps fort long. Le zinc consommé est remplacé par des morceaux de même métal que l'on met dans le cylindre qui contient le mercure.

Souvent il est plus commode, quand on ne veut pas faire fonctionner l'appareil très-longtemps, d'employer l'eau acidulée par l'acide sulfurique, et d'y plonger tout simplement une lame de zinc amalgamé et une lame de cuivre entourant les deux surfaces de zinc à la façon des couples à la Wollaston (fig. 12). Au moyen d'appendices fixés aux deux lames, on les met en relation avec les substances sur lesquelles

on veut opérer. On peut imaginer bien d'autres dispositions; mais elles se rapportent toutes à celles que nous venons de présenter : nous nous sommes attaché à donner celles qui offrent le plus d'avantages dans les recherches scientifiques et les applications aux arts.

En réunissant plusieurs appareils et mettant en relation le cuivre d'un couple avec le zinc de l'autre, on forme des piles dont nous ne nous occuperons que dans le deuxième volume, attendu que, dans ce chapitre, nous n'avons voulu traiter que du dégagement d'électricité et de la construction des appareils électro-chimiques simples, dont la connaissance est indispensable pour l'interprétation du mode d'action de l'appareil dont la découverte est due au génie de Volta.

Des effets électriques produits dans l'action chimique de la lumière solaire.

On doit retrouver dans les phénomènes chimiques produits sous l'influence de la lumière solaire les mêmes effets électriques qui accompagnent les actions chimiques en général. Les premières recherches pour observer ces effets sont dues à mon fils Edmond, et *ont été publiées* en juillet 1839. Il avait remarqué qu'en faisant agir un faisceau de rayons solaires sur deux liquides superposés avec soin et agissant chimiquement l'un sur l'autre, il se développait un courant accusé par un multiplicateur très-sensible, dont les deux extrémités étaient en relation avec deux lames de platine plongeant dans les dissolutions. Le phénomène observé était composé, attendu qu'il se compliquait de l'action de la lumière sur les lames de platine; mon fils fut conduit ainsi à faire une série d'expériences touchant l'action des rayons solaires sur les lames de métaux inoxydables.

Quand deux lames de platine, communiquant avec un galvanomètre, plongent dans un liquide conducteur, il n'y a aucun effet électrique produit toutes les fois que les lames sont très-propres et qu'elles ont la même température; mais pour peu qu'il y ait entre elles une différence de température, il se produit un courant dont l'intensité et la direction dépendent de la nature du liquide et de celle des lames. Or, comme le phénomène se reproduit quand on expose inégalement aux rayons solaires deux lames de platine ou d'or plongeant dans une solution acide neutre ou alcaline, il s'agit de voir jusqu'à quel point la radiation calorifique intervient dans la production du phénomène. Pour cela, il ne faut pas perdre de vue qu'une lame chaude est négative par rapport à une lame froide, lorsqu'on plonge l'une et l'autre dans l'eau ou une solution alcaline, ces deux lames

communiquant métalliquement ensemble, tandis que le contraire a lieu dans un acide. Les effets étant les mêmes par le contact d'un liquide froid avec un liquide chaud, on peut en conclure que l'immersion d'une lame chaude de métal dans un liquide échauffe la couche liquide qui entoure cette lame : d'où résulte un courant électrique dû à la réaction de la couche chaude sur le liquide environnant.

Pour observer les effets de la radiation solaire, on se sert de l'appareil suivant (pl. VI, fig. 13), qui est composé d'une boite de bois, noircie intérieurement et partagée, par une membrane tres-mince, en deux compartiments que l'on remplit de la solution d'essai; dans chacun d'eux plonge une lame de platine ou d'or, dont la surface a été chauffée préalablement au rouge; ces lames sont mises en relation avec un multiplicateur à fil long, et placées horizontalement pour être mieux influencées par la radiation solaire. Chaque compartiment est recouvert d'une planchette mobile formant couvercle, et qu'on enlève quand on veut opérer. Lorsque les compartiments renferment une solution alcaline, on trouve que la lame exposée aux rayons solaires prend au liquide l'électricité négative; avec une solution acide, c'est l'inverse. Dans le premier cas, la déviation est de 2 à 3°; dans le deuxième, de 6 à 7°. On pourrait croire que ces effets sont dus à l'action calorifique des rayons solaires; mais il n'en est pas ainsi, comme on peut le voir en comparant, sous le rapport des effets électriques produits, l'ordre des écrans de verre coloré placés successivement sur l'appareil avec l'ordre de ces mêmes écrans placés sur les deux pôles d'une pile thermo-électrique, car on trouve alors que l'effet n'est pas dû au rayonnement calorifique.

Pour reconnaître comment les diverses parties du spectre agissaient sur les lames de platine, une d'elles fut placée verticalement; on fit tomber dessus les rayons colorés du spectre formé en réfractant les rayons directs du soleil. Les deux compartiments étaient remplis d'eau acidulée; dans celui caché à la lumière se trouvait une lame de platine en relation, comme l'autre, avec un multiplicateur.

Voici les effets obtenus :

Aucune action dans les rayons................	rouges, orangés, jaunes, verts.
Faible action dans les rayons.................	bleus, indigo.
Action marquée dans les......................	rayons violets.

On peut conclure de ces résultats que les rayons qui agissent sur les lames de platine ou d'or plongées dans des dissolutions, étant

plus réfrangibles que les rayons calorifiques, ne sauraient produire des effets de chaleur. Mais quel est le mode d'action de ces rayons? Quoiqu'on ne puisse répondre catégoriquement à cette question, cependant, comme les effets sont presque nuls quand les surfaces sont très-nettes, il est probable qu'ils sont dus à l'action des rayons chimiques sur les corpuscules adhérant aux surfaces. Pour voir jusqu'à quel point cette conjecture est fondée, il faut examiner l'influence que, dans cette circonstance, exercent le charbon et divers oxydes placés en couches très-minces sur les lames; dans ce cas, on trouve que les effets, au lieu d'être plus considérables, sont au contraire moindres; d'un autre côté, si le phénomène est calorifique, la présence de ces corps devrait augmenter le pouvoir absorbant du platine.

On ignore si l'altération excessivement faible du platine n'interviendrait pas dans la production du phénomène; ce qui est certain, c'est qu'en opérant avec une lame en contact depuis plusieurs jours avec l'eau, le courant est moins fort que lorsqu'on vient de faire rougir la lame.

Voyons maintenant ce qui se passe en opérant avec des *lames de* métal oxydable. On s'est servi d'abord de lames de laiton, et pour liquide, de l'eau acidulée par quelques gouttes d'acide nitrique. Les lames ont constamment donné un courant de 4° à 5°, dont la direction était telle, que la lame exposée au rayonnement prenait au liquide l'électricité positive, effet inverse de celui qui aurait eu lieu si la lame eût été attaquée par l'eau acidulée.

Deux lames qui avaient déjà servi furent employées comme électrodes à l'égard d'une pile de trente éléments : la lame positive s'est oxydée, tandis que l'autre est restée brillante; alors on les a exposées successivement aux rayons solaires. La lame brillante s'est comportée comme auparavant, c'est-à-dire qu'elle a pris l'électricité positive : la déviation de l'aiguille était de 3° à 4°; tandis que la lame oxydée est devenue fortement négative, à tel point que l'aiguille du galvanomètre fut chassée violemment à 90°. Cette action énergique n'est produite que lorsque la lame est fortement couverte d'oxyde. L'ordre des lames étant interverti, les effets furent les mêmes; nous devons faire remarquer qu'elles n'étaient mises en expérience qu'après avoir perdu la polarité qu'elles acquièrent quand elles servent d'électrodes. En employant comme écrans les différents verres colorés ci-dessus mentionnés, on a obtenu les résultats suivants, en exposant la lame oxydée aux rayons solaires :

Écrans.	Intensité du courant.	Rapport des effets produits, 100 représentant l'action exercée sans l'interposition d'aucun écran.
Sans écran	35,5	100
Verre violet	9	27
— bleu	10,5	31
— vert	1	2,5
— jaune	6,5	10,5
— rouge	1	2,5

La lame étant exposée aux diverses parties du spectre solaire, on a eu :

Spectre	Intensité du courant.
Dans les rayons rouges	1
— orangés	»
— jaunes	2
— verts	4
— bleus	2
— indigo	»
— violets	0

En opérant avec la lame de laiton décapée et les écrans colorés, on a obtenu un courant en sens inverse du précédent, dont l'intensité varie, comme on le voit dans le tableau suivant :

Écrans.	Intensité.	Rapports des effets produits.
Sans écran	4°,5	100
Verre violet	2°	44,5
— bleu	1°,5	27
— jaune	0	0

Il y a deux effets inverses bien distincts produits lors de l'action des rayons solaires sur les lames de laiton : d'abord celui qui s'opère lorsque la lame est brillante et nette, et le second qui a lieu lorsque la lame est oxydée; on voit, de plus, que les écrans se comportent différemment par rapport aux rayons qui opèrent ces actions.

Avec des lames d'argent et de l'eau acidulée par l'acide sulfurique, on a eu un courant de 1° à 2°, dans une direction telle, que la lame exposée était négative. Avec les lames qui avaient servi d'électrodes, les effets ne furent pas plus marqués. Cette faible action pouvant être négligée, on déposa sur leur surface des vapeurs d'iode et de brôme, afin de voir jusqu'à quel point l'on pourrait observer les effets électriques produits par la réaction de ces deux corps sur l'argent, sous l'influence de la lumière solaire. Chargée d'une couche mince d'iode, la lame prit au liquide l'électricité positive; avec une couche épaisse, l'effet fut inverse : dans le premier cas, la couche d'iodure d'argent passa à un état d'ioduration moindre; dans le second, l'iode réagit sur l'argent. La déviation de l'aiguille fut de 45° à 50°, en opérant sous l'influence des rayons solaires.

Avec une couche épaisse d'iode et les divers écrans de verre coloré, on a eu :

Écrans.	Intensité du courant produit.	Rapports des effets produits.
Sans écran.............	55	100
Verre violet...........	22	40
— bleu............	14	25,5
— jaune...........	7	12,7
— rouge......	1	1,8

Avec la vapeur de brôme, la lame d'argent exposée aux rayons solaires est devenue également négative relativement au liquide; l'action était tellement forte qu'à la lumière diffuse la déviation était de 50°.

La lame ayant été exposée à la lumière diffuse pendant 10′, puis mise à l'abri du rayonnement et exposée de nouveau à son action, la déviation n'a plus été que de 3° à 4°; la réaction était alors en grande partie terminée. Une couche de chlore, substituée à l'iode ou au brôme, a produit un effet à peu près nul. Les effets électriques que nous venons d'exposer servent évidemment à reconnaître et même à mesurer jusqu'à un certain point les réactions qu'éprouvent les métaux et en général les corps conducteurs à la surface desquels on *dépose* des couches de diverses natures, sous l'influence des rayons solaires.

Nous avons à examiner actuellement les effets électriques produits dans l'altération des chlorure, brômure et iodure d'argent sous l'influence de la lumière, effets intéressants à connaître pour expliquer un certain nombre de faits, et en particulier ce qui concerne les actions produites dans la photographie, sous l'influence des rayons solaires.

Commençons par le chlorure d'argent qui se change en sous-chlorure, sous cette influence, et qui, en raison de sa non conductibilité, ne peut être employé qu'en couche très-mince. Une lame de platine plongée dans l'eau reçoit le chlorure nouvellement préparé, en couche la plus mince possible; on dispose ensuite l'appareil comme il a été dit précédemment. A peine la lame est-elle exposée aux rayons solaires, que le chlorure noircit; l'aiguille du multiplicateur est aussitôt chassée dans un sens qui annonce que la lame est positive. Cet effet provient de ce que le chlorure d'argent prend l'électricité positive qu'il transmet à la lame de platine avec laquelle il est en contact, tandis que le liquide prend l'électricité contraire. Cette expérience ne peut être faite avec une lame d'argent qui serait attaquée par le chlore provenant de la décomposition du chlorure, d'où résulterait un courant en sens inverse du précédent. Il faut tenir compte

de l'action du rayonnement solaire sur le platine, qui produit un courant en sens inverse, accusé par une déviation de 1 à 2°. L'or se comporte comme le platine.

Si l'on veut avoir l'effet électrique produit par la décomposition seule du chlorure d'argent, il faut interposer entre le métal et le chlorure une bande de papier non collé. Comme on diminue alors le pouvoir de transmission du circuit, on n'a plus qu'une déviation de 3 ou 4°. Pour que le chlorure d'argent adhère suffisamment à la lame, et qu'il ne s'en détache pas, on la chauffe doucement dans l'obscurité jusqu'à ce que le chlorure soit fondu; les effets sont d'autant plus intenses que la couche de chlorure est plus mince.

Tels sont les phénomènes électriques produits dans l'action chimique de la lumière, dont nous nous servirons pour étudier cette action dans des circonstances où jusqu'ici on n'avait pu le faire.

Des effets électriques produits dans les actions capillaires.

Les actions capillaires sont celles qui s'exercent au contact des solides et des liquides, et des liquides entre eux quand il n'y a pas combinaison; elles cessent aussitôt qu'une couche de liquide s'est déposée sur la surface des solides. Il ne peut donc y avoir que des effets électriques instantanés. Mais comme il y a en même temps production de chaleur, que cette production est elle-même une cause de dégagement d'électricité, et que, d'un autre côté, le corps, avant d'être plongé dans le liquide, est recouvert d'une couche d'air, il s'ensuit que les effets électriques produits sont complexes, et tellement, qu'il est très-difficile de faire la part de chacune des causes actives. Nous n'en faisons mention ici que pour montrer au lecteur combien de précautions on doit prendre pour analyser tous les phénomènes relatifs au dégagement de l'électricité. Pour observer ces effets, on met en rapport avec l'un des bouts du fil d'un multiplicateur, une cuiller de platine remplie d'acide nitrique, dans lequel on plonge une éponge de platine en rapport avec l'autre bout du fil; la cuiller et l'éponge ont été plusieurs fois lavées avec l'acide nitrique, qu'on a chassé en faisant rougir les deux pièces. C'est après être assuré de la netteté des surfaces, que l'on commence l'expérience. Souvent il arrive qu'en plongeant une éponge bien sèche dans l'acide de la cuiller, il y a un fort dégagement d'électricité. L'éponge prend l'électricité négative comme si elle était attaquée. Immédiatement l'aiguille est chassée dans une autre direction, ce qui annonce que la lame et l'éponge se sont polarisées de manière à produire un courant en sens inverse. Avec

de l'acide nitrique étendu, il n'y a pas de polarisation, mais le premier courant persévère pendant quelque temps, et finit par disparaître. Il y a évidemment là un effet secondaire accusé par cette persévérance du courant. Nous terminerons ce que nous avons à dire relativement aux phénomènes électro-capillaires en faisant remarquer qu'à l'instant où l'action capillaire se manifeste, elle doit faire éprouver aux molécules des corps qui en sont l'objet, un ébranlement qui suffit pour détruire momentanément l'équilibre des forces électriques.

Du dégagement d'électricité par l'influence des courants électriques et par les aimants.

Toutes les fois que des courants électriques ou des aimants se trouvent placés à peu de distance des corps conducteurs, il en résulte des effets électriques particuliers, observés pour la première fois par M. Faraday, qu'il a nommés *effets d'induction*, et qui rentrent dans les phénomènes relatifs au dégagement d'électricité. Pour mettre ce fait en évidence, on emploie la disposition suivante : on enroule en spirale sur un cylindre de bois ou autre substance mauvais conducteur de l'électricité, deux fils de cuivre pareils, recouverts de soie, ayant chacun 80 à 100 mètres : ces deux fils forment deux spirales, dont l'une est mise en communication par ses extrémités avec un multiplicateur, et l'autre avec une pile à la Wollaston, d'un certain nombre d'éléments. L'aiguille est aussitôt déviée ; mais elle revient bientôt après dans sa position ordinaire d'équilibre. Il se produit un autre effet, mais en sens contraire, quand le contact avec la pile est interrompu. Par conséquent la production des effets d'induction n'a lieu qu'à l'instant où commence et cesse le courant ; ces effets n'ont donc qu'une durée instantanée. Le courant induit produit par l'action du courant de la pile, nommé *courant inducteur*, est dirigé dans une direction contraire, tandis que celui que donne la cessation du courant inducteur chemine dans le même sens que ce dernier.

On opère de la manière suivante pour obtenir des effets d'induction au moyen des aimants : on enroule de même autour d'un cylindre creux en bois ou en verre un fil de cuivre recouvert de soie, de longueur variable, de 50 à 100 mètres ; puis l'on fait communiquer les deux bouts du fil avec un multiplicateur. En introduisant dans la spirale l'extrémité d'un barreau aimanté, on a un courant instantané, qui chasse l'aiguille dans un sens dépendant de la nature du pôle introduit dans la spirale. L'aiguille revenue à zéro, si l'on retire le barreau, elle est chassée dans un autre sens, puis revient à zéro, ce qui annonce que le cou-

rant est instantané. Tel est l'exposé du phénomène. M. Faraday, auquel est due la découverte des courants par induction, admet, à l'instant où ils se produisent, un nouvel état électrique dans la matière. Suivant lui, quand un fil de métal est soumis à l'induction, il paraît être dans un état particulier, puisqu'il résiste à la formation d'un courant électrique, qui n'a lieu qu'à l'instant où commence cet état particulier auquel il a donné le nom d'*électro-tonique*. Pendant cet état la matière ne possède aucune des propriétés relatives aux corps électrisés ou aimantés ; et l'état électro-tonique est un état de tension équivalent à un courant électrique au moins égal au courant produit, quand l'induction a lieu ou qu'elle cesse. Suivant nous, à l'instant où le courant électrique commence, on peut concevoir qu'il réagisse sur une portion de l'électricité du métal voisin, de manière à chasser une des deux électricités dont la nature dépend du sens du courant, comme cela a lieu dans le dégagement de l'électricité par influence, mais avec cette différence toutefois que, dans le cas actuel, l'une des électricités chassées forme un courant instantané, tandis que l'autre, suivant une direction contraire, est attirée en quelque sorte par le courant, et devient libre aussitôt que le courant inducteur cesse. Puisqu'un courant électrique excite l'induction dans un fil métallique voisin, il doit produire également une induction dans son propre fil ; c'est ce que l'expérience a prouvé, et dont nous nous occuperons plus tard en exposant les phénomènes d'induction sous le rapport de leurs applications à l'étude du magnétisme terrestre et de plusieurs autres phénomènes naturels. Pour compléter tout ce qui concerne le dégagement de l'électricité, nous aurions dû exposer les effets électriques que présentent la torpille, le gymnote, etc. ; mais comme ces effets sont intimement liés aux phénomènes de contraction dont nous avons l'intention de faire une étude toute spéciale, nous avons préféré ne pas séparer ces deux questions ; ainsi nous n'en parlerons que dans le second volume, en traitant des contractions en général.

LIVRE III.

DE LA CHALEUR.

CHAPITRE PREMIER.

De la production de la chaleur.

Dans l'exposé des phénomènes de chaleur, on a séparé longtemps la cause de l'effet; mais aujourd'hui on confond assez généralement, sous la dénomination commune de *chaleur*, le calorique, qui est le principe, et la chaleur, qui est l'effet.

La chaleur possède-t-elle ou non quelques-unes des propriétés de la matière, telles que l'élasticité, la compressibilité et la faculté de se combiner avec les corps? Essayer de résoudre cette question serait entrer dans une discussion de principe sur l'origine de la chaleur, dont nous n'avons pas à nous occuper pour l'instant.

Nous suivrons, à l'égard de la chaleur, la même marche que pour l'électricité, c'est-à-dire que nous exposerons d'abord ce qui concerne le dégagement de la chaleur dans toutes les circonstances où il a lieu.

Une question devrait d'abord nous occuper, celle relative à la mesure des températures, en vue des recherches qui sont du domaine de la physique appliquée; mais, comme la construction et l'emploi de ces appareils reposent sur les propriétés des courants thermo-électriques, dont nous n'avons pas encore parlé, nous préférons commencer par la production de la chaleur.

Nous allons donc étudier d'abord la production de la chaleur : 1° dans les actions mécaniques; 2° dans le passage de l'électricité à travers les corps; 3° dans les actions chimiques; 4° dans les actions capillaires.

Les molécules des corps sont tenues en équilibre par les actions combinées des affinités, de l'attraction moléculaire, de la chaleur et

de l'électricité ; une de ces forces cesse-t-elle d'agir, les autres aussitôt manifestent leur action : ainsi, par exemple, l'attraction moléculaire est-elle détruite ou affaiblie, il y a production d'électricité et de chaleur. Nous avons fait connaître tout ce qui concerne le dégagement de l'électricité ; suivons la même marche relativement au dégagement de la chaleur, d'autant plus que toutes les causes qui troublent l'équilibre des forces électriques dans les corps agissent de même à l'égard de la chaleur.

On peut dès à présent poser en principe que tout changement de volume d'un corps est accompagné d'effets calorifiques : si le volume est diminué, il y a élévation de température ; dans le cas contraire, abaissement. Ces deux effets résultent de ce que, dans le premier cas, la portion de chaleur latente employée à tenir les molécules distendues devient libre, tandis que, dans le second, les molécules reprennent aux corps voisins la chaleur dont elles ont besoin pour occuper un plus grand espace.

Du dégagement de la chaleur dans les actions mécaniques.

Les actions mécaniques comprennent la pression, la percussion et le frottement : les corps sur lesquels on opère peuvent être solides, liquides ou gazeux. Toutes ces actions, en imprimant un mouvement de vibration aux molécules, dégagent de la chaleur.

La pression n'agit que faiblement pour dégager de la chaleur dans les corps solides et liquides, attendu que leur volume n'éprouve pas de diminution sensible. Il n'en est pas de même à l'égard des gaz, qui, en raison de leur compressibilité, sont susceptibles de dégager une grande quantité de chaleur. Le briquet à air nous en offre un exemple ; car on sait que lorsque l'air est comprimé rapidement, au moyen d'un piston, dans un tube de verre ou autre, de manière à être réduit au cinquième de son volume, il se dégage assez de chaleur pour enflammer un morceau d'amadou fixé à l'extrémité de ce piston, et que l'on retire rapidement du tube. Les autres gaz s'échauffent également, mais ne jouissent pas de la propriété d'enflammer de l'amadou ou autre corps combustible, parce qu'ils ne renferment pas tous un principe comburant ; il n'y a que l'oxygène, les gaz qui le renferment et le chlore qui dégagent de la chaleur et de la lumière.

Si la compression exercée sur un gaz rend libre la chaleur latente et élève sa température, la raréfaction d'un gaz doit absorber de la chaleur aux corps environnants et produire un abaissement de température. Pour le prouver, on suspend un thermomètre au milieu

d'un ballon dans lequel on fait le vide; à peine a-t-on enlevé de l'air, que le mercure descend. Le thermomètre de Breguet est employé avec avantage, en raison de sa sensibilité, pour faire cette expérience. On peut aussi se servir de l'appareil thermo-électrique, dont il sera parlé ci-après, attendu qu'il indique des changements de température instantanés.

Les effets deviennent plus manifestes quand on opère de la manière suivante, avec de l'air comprimé à deux ou trois atmosphères : on laisse échapper cet air par une petite ouverture en avant de laquelle on place une boule de verre; celle-ci, en se refroidissant, ne tarde pas à se couvrir de glace, quand l'air ambiant est humide. Si l'on fait rentrer de l'air dans un ballon où l'on a fait le vide, il s'y produit des effets de chaleur complexes : dans les premiers instants, il y a abaissement de température par l'effet de la dilatation de l'air; mais les nouvelles quantités d'air qui arrivent ensuite refoulent celles déjà entrées, d'où résulte un dégagement de chaleur qu'on observe facilement en plaçant des thermomètres à différentes hauteurs dans le récipient.

Les liquides, en général, ne produisent pas de chaleur par la percussion : nous disons en général, car MM. Coladon et Sturm *ont trouvé* qu'en percutant l'éther sulfurique à coup de marteau, on obtenait une variation de 2° dans le thermomètre de Breguet : dans les mêmes circonstances l'eau et l'alcool n'ont rien produit.

On a recherché si le dégagement de chaleur dans la percussion des corps solides était toujours accompagné d'une réduction de volume. Dans le cas, par exemple, où les particules refoulées un instant, reviendraient dans la même position qu'elles occupaient auparavant, devait-il y avoir encore de la chaleur rendue libre? Or, il résulte des recherches de Berthollet, Pictet et M. Biot, que lorsque l'on passe sous le balancier des rondelles de cuivre et d'argent, il y a un fort dégagement de chaleur dans les premiers instants seulement; puis il diminue ensuite rapidement, et enfin, lorsque les molécules sont suffisamment écrouies pour ne plus changer de place, il ne se dégage plus de chaleur, quelle que soit la violence des chocs. Arrivées à ce point, les molécules éprouvent bien encore des dérangements; mais comme elles reviennent dans leur position primitive, la chaleur dégagée par la compression disparaît par l'expansion qui la suit immédiatement.

La quantité de chaleur qui est émise dans le frottement est quelquefois si considérable, qu'elle suffit pour enflammer les corps combustibles. C'est ainsi qu'une roue qui tourne rapidement sur son essieu prend feu, et que le sauvage, avec une dextérité que nous n'avons pas,

parvient à enflammer deux morceaux de bois, en les frottant l'un sur l'autre avec une grande rapidité. Les effets produits sont dus à un mouvement de vibration imprimé par le frottement aux molécules, comme tendent à le prouver encore les faits suivants. Lorsqu'on lime un alliage composé d'une partie de fer et de deux d'antimoine, il en jaillit aussitôt de vives étincelles, qui prouvent que la température est portée jusqu'à l'incandescence.

En frottant vivement l'un contre l'autre deux morceaux de glace, à une température au-dessous de zéro, il se dégage assez de chaleur pour opérer la fusion de la glace à la surface.

Les expériences de M. de Rumford sur la chaleur dégagée dans le forage d'une pièce de canon, nous donnent encore une idée de l'intensité des effets de chaleur produits dans le frottement. Cette expérience étant décrite dans tous les traités de physique, nous ne rapporterons seulement que les résultats auxquels elle a conduit.

Le forage, dans un temps donné, avait détaché de la pièce des écailles métalliques dont le poids était de 443 grammes 61; la quantité de chaleur dégagée fut assez puissante pour élever de 70 degrés la température d'environ 55 kilogrammes de bronze, et cette quantité aurait suffi pour fondre 3 kilogrammes 15 grammes de glace. M. de Rumfort s'est demandé avec raison si cette quantité de chaleur était due à la chaleur latente devenue libre par suite du changement dans l'état moléculaire des écailles formées, ou à une autre cause. Il reconnut d'abord que la chaleur latente n'entrait pour rien dans la production du phénomène; il essaya ensuite de découvrir si l'air ambiant contribuait ou non à la chaleur dégagée, et il lui fut prouvé que l'exclusion de l'air dans la cavité où était introduit le foret, ne diminuait en rien la quantité de chaleur produite par le frottement; enfin, en discutant toutes les causes qui avaient pu intervenir dans la production du phénomène, M. de Rumfort a été seulement conduit à supposer que les vibrations imprimées aux molécules du bronze étaient une des causes qui avaient eu le plus de part dans l'effet produit. C'est précisément une cause semblable qui intervient avec une grande énergie dans le dégagement de l'électricité par frottement.

Tâchons actuellement d'analyser les effets de chaleur produits dans le frottement, afin de les mettre en regard des effets électriques qui ont lieu dans les mêmes circonstances. On ignore jusqu'à présent, quand on frotte deux corps l'un contre l'autre, la portion de chaleur que dégage chacun d'eux, en raison de sa nature et de l'état de sa surface. La question étant des plus complexes, il est bien difficile d'en avoir une solution complète dans l'état actuel de la science; on peut

cependant en approcher au moyen de la méthode expérimentale que je vais indiquer.

Pour déterminer comment chaque corps intervient dans la production de la chaleur, il faudrait écarter les causes diverses qui masquent l'effet que l'on a en vue; c'est ce que l'on ne peut faire entièrement. Effectivement, lorsque l'on frotte plus ou moins rapidement deux corps l'un contre l'autre, en maintenant toujours le contact, il y a évidemment transmission de chaleur d'un corps dans l'autre; la quantité transmise dans chacun d'eux dépend de la conductibilité du corps, de sa capacité pour la chaleur, et de l'état de sa surface. D'après cela, la chaleur dégagée sur la surface de chaque corps par le frottement d'un autre corps, ne saurait être accusée immédiatement, c'est-à-dire, avant la transmission qui a lieu d'un corps à l'autre. Il est possible, néanmoins, d'opérer dans des circonstances qui permettent d'écarter plusieurs des difficultés qui viennent d'être signalées; on est conduit alors à une série de faits que l'on va exposer, et qui ne sont pas sans intérêt pour la théorie du dégagement de la chaleur.

L'appareil destiné à observer ces faits se compose d'une pile thermo-électrique en relation avec un excellent multiplicateur M, comme l'indique la fig. 14, pl. VI, et dont la sensibilité est suffisante pour permettre d'observer une différence d'environ un centième de degré centigrade entre la température des deux faces de la pile.

Pour réduire en quelque sorte la question à sa plus simple expression, on opère avec deux corps de même nature, mauvais conducteurs de la chaleur, égaux dans leurs dimensions, taillés en rondelles de 1 à 2 millimètres d'épaisseur, et ne présentant de différence que dans l'état de leur surface. Ces corps sont fixés avec du mastic à l'extrémité de tiges de verre *tt'* : les surfaces des rondelles sont mises en contact; on les presse légèrement l'une sur l'autre, et on leur imprime un mouvement de rotation pendant un temps déterminé, de manière à obtenir toujours le même nombre de tours dans le même temps. Les deux corps sont séparés ensuite rapidement et mis en contact, chacun d'eux, par la surface frottée, avec une des faces de la pile avec laquelle il partage sa chaleur acquise. Les deux corps ont-ils la même température, l'aiguille aimantée reste en repos, attendu que les deux courants thermo-électriques étant égaux et dirigés en sens contraire, se détruisent. La température est-elle différente dans les deux corps, l'aiguille aimantée est aussitôt déviée, et l'angle d'écart indique la différence de température, en se servant de tables construites préalablement pour faire connaître, d'une part, les rapports existant entre

la déviation de l'aiguille aimantée et l'intensité du courant ; et de l'autre, la déviation correspondante à une différence de température donnée. On peut consulter à cet égard les méthodes employées pour former ces tables (*). Les effets ne sont comparables, néanmoins, qu'autant que le frottement est produit avec une vitesse et une pression connue, et que les deux corps sont séparés rapidement l'un de l'autre et mis immédiatement en contact avec les faces de la pile. Avec un peu d'habitude on parvient à remplir ces conditions, comme les résultats qu'on rapportera ci-après le prouveront.

Avant de passer aux expériences, et afin de bien connaître la marche de l'appareil, il est nécessaire de chercher l'effet produit par le courant thermo-électrique sur l'aiguille aimantée, lorsqu'on met en contact, avec une des faces de la pile, un des deux corps possédant une température supérieure à celle de l'air ambiant. On trouve alors que, quelle que soit la nature des corps ou disques frottés, qu'ils soient conducteurs ou non de la chaleur, le temps que met l'aiguille pour atteindre son maximum d'écartement, pourvu que cet écartement ne dépasse pas 60°, est toujours de 10″ ; pour des écartements de 60 à 75°, il est de 9″, 5 ; de 9″ pour des déviations de 75 à 90. Cela tient à la force d'inertie de l'aiguille, laquelle force est vaincue d'autant plus facilement que l'intensité du courant est plus grande.

L'aiguille aimantée se comporte ici comme un pendule qui oscille sous l'action de la pesanteur, entre de petites amplitudes, puisque les oscillations sont isochrones ; mais avec cette différence, néanmoins, que dans le pendule, l'amplitude de l'oscillation augmente, tandis que le contraire a lieu dans les expériences citées, puisque le temps diminue à mesure que l'amplitude augmente au delà de 60° jusqu'à 90°. On montre l'isochronisme des déviations par première impulsion, en mettant en contact une substance taillée en disque, pendant une seconde, avec une source de chaleur possédant une température constante, et l'appliquant ensuite sur une des faces de la pile.

Substances soumises à l'expérience.		Déviation lors de la première impulsion.	Temps.	Moyenne.
Verre poli...	1re expérience......	39	10″	10,43
	2 —	37	10	
	3 —	39	11	
	4 —	38	11	
	5 —	41	11	
	6 —	36	10	
	7 —	38	10	

(*) *Traité de l'électricité*, t. 2 et suiv., p. 11.

Verre dépoli.	1re expérience......	48	10	10
	2 —	49	10	
	3 —	51	10	
	4 —	55	10	
	5 —	50	10	
	6 —	52	10	
Liége.......	1re expérience......	10	10	9,8
	2 —	12	10	
	3 —	11	9	
	4 —	12	9	
	5 —	11	11	
Argent......	1re expérience......	56	10	10
	2 —	55	10	
	3 —	57	10	
	4 —	55	10	
	5 —	57	10	

Ces résultats montrent bien l'isochronisme des déviations, à part les légères différences qui doivent être attribuées aux erreurs d'observation; car il est bien facile de se tromper d'une demi-seconde quand on évalue le temps de la durée d'une oscillation entière, attendu que l'on ne peut savoir l'instant précis où l'aiguille entre en mouvement et celui où elle s'arrête, surtout quand l'intensité du courant est faible. Dans les expériences qu'on a faites pour s'assurer si cette *loi* avait encore lieu pour des déviations plus considérables, on a pris un disque d'argent que l'on a chauffé successivement, de manière à obtenir des déviations par première impulsion de 1 à 90°; on a obtenu les résultats suivants :

Déviations.	Temps évalué en 1/2 secondes.
1°	20
2	20
4	20
6	20
10	20
12	20
23	20
40	20
43	20
54	20
56	20
59	20
60	19
63	19
65	19
67	19
70	19
75	18
82	18
83	18
88	18
89	18

Il est donc bien prouvé que de 1 à 60° environ, la durée de chaque déviation est de 10″; de 60 à 70, elle est de 9″, 5; de 70° à 90°, de 9″. Il ne faut pas oublier que les déviations de l'aiguille jusqu'à 20° répondent à des intensités égales du courant, et que, au delà, les déviations ne sont plus proportionnelles aux intensités.

Quand une des faces de la pile est échauffée par le rayonnement direct de la flamme d'une lampe ordinaire placée à un mètre de distance au lieu de l'être par transmission directe, les résultats sont encore les mêmes :

Déviations.	Temps en 1/2 secondes.
6°	20
8	20
25	20
60	20
61	20
69	19
71	19
75	19

Il est prouvé par là que l'effet est indépendant du plus ou du moins de conductibilité des disques employés. Pour voir jusqu'à quel point les faits précédents dépendent de l'action exercée par le magnétisme terrestre sur le système des deux aiguilles du multiplicateur, on a déterminé le temps d'une oscillation du système auquel on imprime une impulsion avec un aimant. A cet effet, on a approché, à diverses distances de l'aiguille supérieure, un barreau légèrement aimanté, de manière à la faire dévier d'un certain nombre de degrés, puis, ayant rapidement retiré le barreau, on a compté le temps d'une oscillation.

Voici les résultats obtenus pour diverses amplitudes :

Déviations.	Temps d'une oscillation en 1/2 secondes.
4°	18
5	18
8	18
10	18
12	18
15	18
20	18
42	19
46	19
55	20
63	20
65	20
70	20
80	20

On voit, comme dans le pendule, que le temps des oscillations augmente à mesure que la déviation devient plus grande, tandis que, lorsque l'aiguille aimantée est déviée par l'action d'un courant thermo-électrique, les effets sont inverses. Pour connaître la cause de cette différence, on a porté le disque d'argent échauffé sur l'une des faces de la pile, au point de produire une déviation de 80°; puis après un contact de quelques secondes, lorsque l'aiguille était parvenue à une division quelconque du cercle, à 30° par exemple, on a interrompu le circuit; l'aiguille a continué à cheminer en vertu de la vitesse acquise jusqu'à 50° seulement; elle s'est arrêtée et est retournée à zéro après plusieurs oscillations. Cette expérience, répétée plusieurs fois, a donné constamment le même résultat. On doit en conclure que le disque ne se met pas immédiatement en équilibre de température avec la face de la pile, que le disque soit excellent ou mauvais conducteur; de sorte que l'isochronisme observé dépend de la propagation de la chaleur dans la face échauffée de la pile.

Lorsqu'on frotte rapidement l'un contre l'autre deux disques de liége disposés comme il a été dit, mais dont l'un a une surface lisse obtenue avec un instrument tranchant, et l'autre une surface couverte d'aspérités, et que l'on présente simultanément les deux surfaces frottées aux deux faces de la pile pour savoir si chacune d'elles a pris ou non la même température, on obtient un courant dont la direction, due à une différence dans les effets thermo-électriques, indique que le disque à surface couverte d'aspérités possède une température plus élevée que l'autre, dans un rapport tel, que la déviation de l'aiguille varie de 10° à 1°, suivant que l'on a frotté plus ou moins fort.

Un morceau de verre poli et un morceau de verre dépoli produisent le même effet; c'est-à-dire que le premier prend moins de chaleur. Il semble résulter de là que les surfaces qui ont le plus grand pouvoir absorbant sont celles qui s'échauffent le plus.

Le tableau suivant renferme les résultats d'un certain nombre d'expériences obtenus dans le frottement exercé pendant une minute :

SUBSTANCES frottées.	DIFFÉRENCE de température en plus ou en moins moyenne.	DÉVIATION de l'aiguille aimantée. Déviations.	MÉTAUX fonctionnant seuls.
Verre poli....... Liége..........	Plus Moins	38°, 41°, 42°	34° 5°
Argent......... Liége..........	Plus Moins	32°, 33°, 35°, 33°	50° 12
Argent........ Verre poli......	1er instant, plus 2e — moins »	3° 2°, 0, ?, 3, 10 9, 8, 13, 11	» »
Caoutchouc...... Liege.........	Plus Moins	30°	29° 11°
Verre dépoli..... Liége..........	Plus Moins	48°	40° 7
Fer .... Liége..........	Plus Moins	64°	6 53°
Argent......... Satin blanc......	Plus Moins	47°	
Argent......... Satin noir........	Plus Moins	3°	
Satin noir....... Liege..........	Plus Moins	6°	
Liége.......... Cire d'Espagne....	Moins Plus	27°	
Or........... Liége..........	Plus Moins	30°	
Cire d'Espagne... Verre dépoli.....	Plus Moins	5	

Autre série d'expériences.

Les corps étaient taillés en disques de huit millimètres de diamètre et trois millimètres d'épaisseur : le frottement a duré une minute.

Spath d'Islande. Plus....... Liége......... Moins......	1re expérience...........	13°
	2 —	14
....	3 —	16
Succin poli. Plus....... Liége......... Moins......	1re expérience...........	28°
	2 —	32
....	3 —	30

De tous ces résultats, on tire les conséquences suivantes :

1° Avec le verre poli et le liége, le premier prend plus de chaleur que le second dans un rapport tel, que chacun d'eux agissant sépa-

rément, les déviations de l'aiguille aimantée sont comme 34 : 5; et comme ces déviations correspondent à des intensités de courant égales à 39 et 5, il s'ensuit que les quantités de chaleur prises pendant le frottement et transmises à la pile sont entre elles dans le même rapport;

2° Avec le verre dépoli et le liége, le rapport des déviations est comme 40 : 7, et celui des intensités du courant comme 37 : 7;

3° Avec l'argent et le liége, le rapport des déviations est comme 50 : 12, et celui des intensités comme 78 : 12;

4° Avec le caoutchouc et le liége, le rapport des déviations est comme 39 : 11, et celui des intensités comme 31 : 11.

Les expériences précédentes ont été faites, à la vérité, sans soumettre le frottement à des moyens exacts de mesure; mais en opérant, comme je l'ai déja indiqué, on acquiert bientôt assez d'habitude pour que les résultats présentent peu de différence quand on répète les expérences. Ainsi, avec l'argent et le liége, on a eu successivement des déviations égales à 32°, 33°, 36°, 35°, et avec l'argent et le verre poli 10°, 9°, 13°, 8°, 11°. Des résultats consignés dans les tableaux précédents, on ne peut tirer encore aucune loi simple touchant le dégagement de la chaleur dans le frottement, vu les causes diverses qui concourent à la prodution de ce phénomène; mais on voit que la nature des corps, abstraction de leur conductibilité, exerce une influence que l'état des surfaces ne détruit pas toujours.

Jusqu'ici, il est impossible d'apercevoir la véritable cause de cette influence qui dépend de la nature des corps, et probablement de l'arrangement de leurs molécules; mais c'est déjà quelque chose d'avoir signalé ce fait, puisqu'il donne un élément de plus qui pourra être pris désormais en considération dans les recherches relatives à la production de la chaleur. Si le frottement produit des effets de chaleur dont les lois soient très-compliquées, on doit avoir des effets très-remarquables quand on ébranle les molécules des corps jusqu'à détruire la force d'agrégation. On n'a encore fait aucune expérience à cet égard, et certes elles ne pourraient manquer d'avoir le plus grand intérêt; mais les moyens d'expérimentation présentent de grandes difficultés.

Les expériences dont nous venons de rendre compte montrent de combien de difficultés sont environnées les recherches relatives aux lois qui président au dégagement de la chaleur dans le frottement.

Mais avant de terminer, nous croyons devoir indiquer un mode d'expérimentation qui aplanira quelques-unes de ces difficultés. Supposons que l'on veuille avoir la chaleur dégagée dans le frottement de deux petits disques l'un contre l'autre; après avoir fixé chacun de ces disques à un manche mauvais conducteur, de la manière indiquée précédemment, et adapté au manche un écran en carton, fig. 14, pour se garantir du rayonnement calorifique de la main, on prend deux aiguilles composées chacune d'une aiguille d'acier et d'une aiguille de cuivre soudées par un de leurs bouts. On introduit ces aiguilles dans les disques, de manière que les soudures soient placées le plus près possible des surfaces soumises au frottement, puis on fait communiquer ces aiguilles, d'une part, entre elles avec un fil de cuive, de l'autre, avec un multiplicateur thermo-électrique; dès l'instant que les surfaces s'échauffent par l'action du frottement, les soudures s'échauffent également, et l'aiguille aimantée est déviée; or, suivant les bouts des deux aiguilles qui communiqueront ensemble par l'intermédiaire du fil de cuivre, on aura la somme ou la difference des effets calorifiques; d'après cela, en faisant deux expériences d'abord pour avoir la somme, puis la différence, et attendant chaque fois que les disques aient pris une température constante, afin que l'aiguille soit stationnaire, la demi-somme et la demi-difference des nombres représenteront les intensités électriques des courants, et par suite les températures de chaque disque. Si l'on connait, en outre, le poids, la chaleur spécifique des disques et celle des aiguilles ainsi que le poids et les chaleurs spécifiques de la portion des aiguilles engagées, il sera facile de trouver la quantité absolue de chaleur dégagée. Cette addition au mode d'expérience a été indiquée par mon fils Edmond.

CHAPITRE II.

Des effets électriques produits au moyen de la chaleur.

On a vu que la chaleur et l'état des corps exerçaient une grande influence sur le dégagement de l'électricité dans le frottement, et que les corps qui avaient une température plus élevée, ou qui s'échauffaient le plus, tendaient à prendre l'électricité négative. On dut conclure de là qu'il existait des rapports tellement intimes entre la chaleur et l'électricité, que l'une accompagne la production de l'autre, et *vice versâ*. Les rapports entre la chaleur et le fluide électrique commencent donc à se manifester sous nos yeux d'une manière si intime, que nous devons les étudier avec soin, d'autant plus qu'ils servent à la théorie électro-chimique que nous développerons plus tard.

Nous commencerons par étudier l'action de la chaleur pour provoquer des effets électriques, d'abord dans les corps conducteurs, puis dans les corps mauvais conducteurs, et ensuite nous nous occuperons de la chaleur produite par l'électricité.

Si l'on introduit un fil de platine dans un tube de verre fermé à la lampe par l'une de ses extrémités, et que l'on fasse communiquer le bout libre du fil avec le plateau supérieur d'un condensateur platiné ou doré, en touchant du doigt le plateau inférieur, et qu'au moyen d'une lampe à alcool, on porte au rouge la partie du tube qui est fermée, on n'obtient aucune charge électrique en séparant les plateaux. Mais si l'on enroule sur l'extrémité du tube qui a été fermé, le bout *a* d'un fil de platine dont le bout libre *b* communique avec le sol, et que l'on chauffe la partie enroulée jusqu'à l'incandescence, le fil intérieur transmet au condensateur une charge très-sensible d'électricité positive. Or les points *a* et *b* n'ayant pas la même température, et le verre qui les sépare étant devenu conducteur de la chaleur, il faut donc que le bout inférieur *b*, qui est moins chaud que le bout *a*, prenne l'électricité négative, et *a* l'électricité positive. Ce résultat nous conduit à un principe important dont voici l'énoncé : Lorsqu'un fil de métal (fig. 15, pl. VI) non oxydable ou une suite de particules a, a', a'' etc., liées entre elles par la force d'agrégation, est mis en contact par l'une de ses

extrémités a avec une source de chaleur b, d'une nature quelconque, à l'instant où la chaleur commence à se propager dans le fil, cette extrémité prend l'électricité positive, tandis que l'électricité négative retourne vers la source; mais a' recevant de la chaleur de a par rayonnement, puisque la chaleur se transmet de particule à particule, et a'' de a', ainsi de suite, la seconde particule, qui s'échauffe aux dépens de la première, prend à celle ci, à chaque instant, de l'électricité positive et lui transmet de l'électricité négative, jusqu'à ce que l'équilibre de température soit rétabli entre elles. D'un autre côté, la décomposition du fluide électrique étant immédiatement suivie d'une recomposition des deux fluides dégagés, il en résulte une foule de décompositions et de recompositions de fluide électrique, qui ne cessent que lorsque l'équilibre de température est complétement établi dans toutes les parties; d'après cela, il ne peut y avoir d'électricité libre qu'aux deux extrémités. Si donc l'on touche le bout incandescent avec un corps conducteur assez volumineux, tel qu'un morceau de papier humide ou un morceau de bois mouillé, on enlève à ce bout son électricité positive, et il ne reste au fil que l'électricité négative. Cette expérience prouve que pendant le mouvement de la chaleur dans une barre de métal, il s'opère une suite de décompositions et de recompositions de fluide électrique qui ont de l'analogie avec le mode de propagation de la chaleur dans les corps. L'expérience suivante vient confirmer cette manière de voir :

Soit un circuit formé d'un fil de platine dont les deux extrémités sont en communication avec un multiplicateur thermo-électrique; si l'on élève la température d'une partie quelconque du fil de platine, loin des sondures, l'équilibre des forces électriques ne saurait être troublé en raison de l'homogénéité de toutes les parties, et de ce que la propagation de la chaleur se fait également à droite et à gauche des points échauffés. Mais il n'en est plus de même quand on forme un nœud ou une spirale en o, à peu de distance du foyer de chaleur f; il se produit alors un courant dont la direction indique que la spirale a pris l'électricité positive; or, comme il n'y a dans cette partie aucune soudure, il faut en conclure que l'effet électrique est dû à une différence dans la propagation ou le mouvement de la chaleur à droite et à gauche du point f, par suite de la présence de la spirale; les fils métalliques bons conducteurs de la chaleur produisent des effets nuls.

On obtient des effets analogues à ceux qui viennent d'être exposés, lorsqu'il y a solution de continuité dans un fil de platine. Supposons fixés aux deux extrémités du fil d'un multiplicateur, deux fils de pla-

tine parfaitement homogènes, et terminés en spirale ; plongeons une de ces spirales dans la flamme d'une lampe à alcool, retirons-la quand elle est rouge, et posons-la sur celle qui est à la température ordinaire, il y a courant électrique, dont la direction est telle, que le bout qui s'échauffe prend à l'autre l'électricité positive. Avec deux fils de cuivre, parfaitement décapés, on n'obtient un courant qu'autant que l'une des spirales est primitivement oxydée, afin de diminuer la conductibilité. L'application d'une couche très-mince de mercure, d'étain, d'or ou d'argent purs sur la spirale, produit un effet semblable ; il suffit, en un mot, de changer la propagation de la chaleur, pour avoir un dégagement d'électricité. L'or et l'argent présentent les mêmes effets que le cuivre quand ils sont purs ; mais s'ils renferment du cuivre, la couche d'oxyde qui se forme quand l'on chauffe suffit pour mettre obstacle à la propagation de la chaleur. Veut-on avoir un courant continu, on prend deux fils de cuivre, en rapport chacun par un bout avec l'une des extrémités du fil d'un multiplicateur, on réunit les deux bouts libres, au moyen de deux crochets passés l'un dans l'autre, et l'on chauffe jusqu'au rouge, à droite ou à gauche des points de jonction, avec une lampe à alcool; il se produit un courant électrique dirigé du côté chaud au côté froid, aussitôt que la surface du cuivre est recouverte d'une couche d'oxyde. En opérant avec des métaux oxydables, tels que l'antimoine, le zinc et le fer, les effets sont inverses, c'est-à-dire que le courant va du froid au chaud. L'oxydation n'est pas la seule cause de cette inversion, car, s'il en était ainsi, le côté chaud, qui serait le plus attaqué, continuerait à être négatif.

Le plomb et l'étain donnent des effets variables, en raison de leur hétérogénéité. On a vu, en effet, par ce qui précède, que si les fils ou masses métalliques recèlent des corps étrangers qui tendent à modifier la propagation de la chaleur, les deux électricités se séparent au point où se trouvent ces parties étrangères. On en a un exemple dans le fer, qui n'est presque jamais exempt de carbone ou d'oxyde. En effet, si un fil de fer, étant en rapport avec un multiplicateur, on promène la flamme d'une lampe à alcool successivement sur tous les points, en portant la température jusqu'au rouge, et éloignant la flamme des soudures pour ne pas les échauffer, on obtient souvent un courant électrique qui ne peut être attribué qu'à l'inégale propagation de la chaleur dans deux portions contiguës ; mais comme toutes les parties ne donnent pas lieu à cet effet, on peut l'attribuer à la présence de corps étrangers.

Il résulte des faits précédents qu'en prenant deux fils de platine, de

diamètre différent, communiquant par un de leurs bouts avec le multiplicateur, et en contact par leur bout libre terminé en anneau, si l'on plonge l'anneau du fil le plus fin dans la flamme d'une lampe à alcool, on a un courant continu, par suite de l'inégale propagation de la chaleur dans les deux fils. Nous répétons encore que toutes les causes qui tendent à modifier la propagation de la chaleur troublent l'équilibre des forces électriques. Nous citerons l'expérience suivante, qui rentre dans les précédentes : M. Peltier prépara un fil de métal de 6 mètres de long, mais de diamètre différent dans plusieurs parties ; trois de ces parties avaient un millimètre de diamètre, trois autres un demi-millimètre, et cela sans aucune soudure; le fil était toujours parfaitement homogène, et sans soudure. Toute influence étrangère étant écartée, les effets produits, en chauffant les points où le fil changeait de diamètre, ne pouvaient être attribués qu'à la différence qui avait lieu dans le changement subit de la propagation de la chaleur. Le courant électrique allait presque toujours du côté chauffé au côté froid : quand on trouve une anomalie, l'effet est contraire ; il existe souvent des parties hétérogènes qui viennent compliquer les résultats ; aussi, en raccourcissant ce fil, on parvient à trouver le point qui donne un effet neutre : au delà, on retrouve les effets précédemment indiqués. Lorsque l'on opère avec un fil de cuivre, il faut attendre que l'équilibre soit parfaitement rétabli avant de commencer l'expérience.

On doit donc regarder comme démontré que, lorsque la chaleur chemine dans un corps, à l'endroit où elle rencontre un obstacle, il y a séparation des deux électricités, comme si la chaleur se décomposait alors en ses deux éléments. Mais cet obstacle peut provenir non-seulement de la présence de corps étrangers, mais encore de l'état cristallin des corps, en vertu duquel l'élasticité des parties n'étant pas la même dans tous les sens, la propagation de la chaleur ne doit pas être uniforme. Deux exemples suffiront pour montrer les effets thermo-électriques produits dans ce cas.

Dans un rectangle *a b c d* (pl. VI, fig. 16) formé de quatre carreaux de bismuth soudés bout à bout, si l'on élève la température de différentes parties au moyen d'une lampe à alcool, et que l'on place au-dessus du rectangle une aiguille aimantée délicatement suspendue, on trouve les effets suivants :

Quand on chauffe le point	*a*	le courant	va de	*b* en *a*
	b	—	—	*b* — *a*
	c	—	—	*b* — *a*
	d	—	—	*a* — *b*

M. Sturgeon, auquel est due cette expérience, a trouvé, après quelques essais et en chauffant à peu de distance de *b*, un point qui ne donnait aucun courant. Ces effets varient d'un rectangle à l'autre, attendu qu'ils dépendent de la construction et de l'état cristallin de chaque barreau et des soudures. Pour éviter ces dernières, prenons un barreau rectangulaire de bismuth *ac* (fig. 17, pl. VI).

En le chauffant en *b*, il est devenu fortement magnétique; le courant se dirigeait vers le côté *c;* deux faces étaient à l'état neutre. Lorsque toute l'extrémité *c* était chauffée uniformément, le courant atteignait le maximum d'intensité, et passait par les mêmes faces du prisme en se dirigeant en sens inverse. En chauffant uniformément le bout *a*, il ne se manifestait aucun courant jusqu'à ce que la chaleur eût atteint un certain point *b;* l'effet était alors le même que si l'on eût chauffé ce point. En supprimant l'extrémité neutre, le reste du barreau devenait magnétique, quelle que fût l'extrémité à laquelle la chaleur fût appliquée.

Nous ne poursuivrons pas plus loin l'examen des effets électriques produits dans des masses formées d'un métal qui cristallise facilement, attendu qu'ils ne peuvent conduire à aucune loi, vu l'impossibilité où l'on est de déterminer l'état cristallin des parties. Il n'en est pas de même des effets thermo-électriques produits dans des circuits fermés, composés de deux métaux différents; ils sont assez remarquables, car ils se rattachent aux effets électriques de frottement et à une propriété calorifique des corps dont il sera bientôt question. On a vu que l'on obtient dans un fil de platine un courant électrique continu quand, ayant réuni ensemble les deux bouts libres au moyen de deux anneaux passés l'un dans l'autre, on porte le foyer de chaleur à droite ou à gauche des points de jonction; et qu'il en est encore de même en opérant avec deux fils de cuivre, dont une des surfaces a été préalablement oxydée. Mais si l'expérience se fait avec deux fils de métaux différents, soudés par un de leurs bouts, ou seulement rapprochés par une forte pression, et en communication de l'autre avec un multiplicateur, on a des courants qui permettent de ranger les métaux dans l'ordre suivant : bismuth, platine, plomb, étain, cuivre, or, argent, zinc, fer et antimoine. Dans cette classification, chaque métal est positif par rapport à celui qui le précède, et négatif relativement à ceux qui le suivent; cet ordre est précisément le même que celui que nous avons indiqué pour les effets électriques de frottement que nous n'avons pu attribuer entierement à la chaleur dégagée, car, si au lieu de frotter légèrement deux lames

l'une contre l'autre, on les frappe à coups redoublés en évitant les frottements latéraux, il ne se produit pas de courant, quoiqu'il y ait plus de chaleur dégagée que dans le premier cas ; il faut donc, puisque les mêmes points des surfaces restent en contact : 1° que l'électricité dégagée sur chacune d'elles n'ait pas eu besoin, pour se recombiner, de suivre le fil du multiplicateur, la recomposition s'opérant immédiatement ; 2° que la chaleur produite dans le frottement ne soit pas la cause unique des effets électriques, car celle qui se dégage pendant un choc violent est probablement plus forte que celle produite par un faible frottement.

Si l'on interrompt par un liquide un circuit thermo-électrique au moyen de deux lames de platine plongeant dans ce liquide, et en communication avec les lames ou fils de métal, on n'obtient qu'un faible courant en chauffant la soudure; cela vient de ce que le liquide, en raison de sa mauvaise conductibilité, détermine la recomposition des deux électricités au contact des deux métaux.

Diverses substances minérales, telles que la plombagine, le peroxyde de manganèse, le persulfure de fer, peuvent servir à former des circuits thermo-électriques La plombagine est positive par rapport au platine, tandis que ce dernier est positif relativement au peroxyde de manganèse et au persulfure de fer.

En cherchant parmi les propriétés calorifiques des corps celles qui ont quelques rapports avec les précédentes, on ne trouve que la chaleur spécifique, car l'ordre des métaux rangés suivant leur chaleur spécifique est : bismuth, plomb, or, platine, argent, antimoine, zinc, cuivre et fer. Quoique dans les deux tableaux le rang de chaque métal ne soit pas le même, on voit cependant qu'à peu d'exceptions près les métaux les plus électro-négatifs sont ceux qui ont le moins de chaleur spécifique. La capacité calorifique peut donc influer jusqu'à un certain point sur les phénomènes thermo-électriques. De plus, nous avons vu que le pouvoir conducteur pour l'électricité était aussi une des causes des phénomènes thermo-électriques; en voilà donc deux qui concourent à l'effet général. Continuons l'examen de ces phénomènes.

On prend un circuit composé de fils de différents métaux dans lequel le cuivre et le fer sont d'abord en contact immédiat en *a*, et partout ailleurs ils sont séparés aux soudures *b* et *c*, *d* et *e*, *f* et *g*, par des fils de platine, d'or et d'étain. On commence à porter la soudure *a* à 50°, tandis que l'on maintient à zéro toutes les autres ; on observe alors l'intensité du courant, puis l'on porte successivement à 50° les soudures *b* et *c*, *d* et *e*, *f* et *g*, en maintenant égale-

ment toutes les autres à zéro. Dans ces diverses circonstances, les courants produits ont toujours la même intensité, de sorte que le fer et le cuivre, quand ils sont en contact ou séparés par d'autres métaux, donnent naissance à un courant dont l'intensité est la même. Cette intensité ne dépend par conséquent que de la température des deux points extrêmes. Ce fait est très-important, puisqu'il tend à démontrer que le courant ne provient pas d'une action de contact, mais d'une différence dans le mode d'action de la chaleur sur chaque métal en particulier.

Prenons actuellement un circuit composé d'un fil de cuivre et d'un fil de fer soudés bout à bout, et chauffons inégalement les deux soudures pour savoir suivant quelle loi varie l'intensité du courant.

TEMPÉRATURES			DÉVIATIONS de l'aiguille aimantée.	INTENSITÉ correspondante du courant.
de la première soudure.		de la deuxième soudure.		
1re EXPÉRIENCE.	50	00	7°,15	11
	100	00	12 ,75	22
	150	00	16 ,00	31
	200	00	18 ,00	37
	250	00	19 ,00	40
	300	00	00 ,00	00
2e EXPÉRIENCE.	50	50	00 ,00	00
	100	Id.	7 ,25	11
	150	Id.	11 ,75	20
	200	Id.	14 ,00	26
	250	Id.	15 ,25	29
	300	Id.	16 ,00	30,50
3e EXPÉRIENCE.	50	00	00	00
	100	100	00	00
	150	Id.	6	9
	200	Id.	9 ,50	15
	250	Id.	11	18
	300	Id.	00	00

Les résultats consignés dans ce tableau conduisent aux conséquences suivantes :

L'intensité 11 du courant produit par les températures 100° et 50° dans la deuxième expérience est égale à la différence des intensités 22 et 11 des courants obtenus dans la première expérience, pour les

températures 100° et 50° de la même soudure, l'autre étant à zéro. De même l'intensité 20 de la deuxième expérience est égale à la différence des intensités 31 et 11, première expérience, correspondant aux températures 50° et 100°. Concluons de cette règle que dans le circuit fer et cuivre, quand on élève chacune des soudures à une température différente, l'intensité du courant est égale à la différence des intensités du courant produit successivement par chacune de ces températures, l'autre étant à zéro, et non à l'intensité du courant qui résulte de la seule différence de température.

Il est aisé de prouver que, en général, les effets produits sont dus au mouvement de la chaleur et non à l'oxydation, puisque les mêmes effets ont lieu dans des milieux privés d'oxygène.

Nous allons voir maintenant la marche que suit l'intensité du courant lorsque l'une des soudures ayant une température constante, on élève successivement celle de l'autre.

Si l'on opère avec un circuit composé d'un fil de platine et d'un fil de palladium, on trouve que depuis zéro jusqu'à 350° pour chaque accroissement égal de température, l'intensité du courant croît de la même quantité. Mais il n'en est pas de même dans les circuits où se trouvent d'autres métaux, du moins au delà de certaines limites, comme on peut le voir dans le tableau suivant :

DÉSIGNATION du circuit.	TEMPÉRATURE d'une des soudures, l'autre étant à zéro.	DÉVIATION de l'aiguille aimantée.	OBSERVATIONS.
+ − FER-CUIVRE.	50°	10°	Au rouge sombre, la déviation change de sens.
	100	20	
	150	25	
	200	27,50	
	250	28,50	
	300	29	
+ − ARGENT-ZINC.	0	0	
	20	2	
	39	4	
	58	6	
	80	8	
	120	10	
	160	8	
	187	6	
	207	4	
	215	2	
	225	0	

DÉSIGNATION du circuit.	TEMPÉRATURE d'une des soudures, l'autre étant à zéro.	DÉVIATION de l'aiguille aimantée.	OBSERVATIONS.
	225	0	
	236	2	
	247	4	
	253	6	
+ −	262	8	
Zinc-argent.......	270	10	
	281	12	
	300	14	
	290	12	
	282	10	
Avec le zinc et l'or, à 70°, la variation est d'environ 2° ; mais en continuant à élever la température, elle diminue, et à 150°, elle est nulle ; elle recommence alors en sens inverse.			
	150	0	
	180	2	
	195	4	
+ −	219	6	
Or-zinc............	220	8	
	240	10	
	255	12	
	275	14	

On tire les conséquences suivantes des résultats consignés dans ce tableau :

1° Dans un circuit fer et cuivre, l'une des soudures étant à zéro et l'autre croissant depuis zéro jusqu'à 300°, l'intensité du courant ne croît pas proportionnellement à la température; à 300° elle est à peine sensible ; mais si l'on continue à élever la température, le courant devient stationnaire, son intensité commence à décroître, et il finit par changer de direction quand la température est au rouge sombre.

2° Le zinc et l'argent, le zinc et l'or donnent des effets semblables. L'argent est d'abord positif ; le courant augmente d'intensité jusqu'à 120°, diminue et devient nul pour se reproduire en sens inverse, c'est-à-dire que le zinc devient positif et conserve cet état jusqu'à la fusion. Aussitôt que l'on cesse d'élever la température, le courant diminue et finit par reprendre sa première direction ; l'or se comporte de même que l'argent. Quelle est la cause de ce singulier

phénomène ? On ne peut l'attribuer qu'à des modifications dans l'état d'agrégation des molécules et à un contact plus ou moins imparfait quand on superpose les deux métaux l'un sur l'autre, et non à l'action de l'air sur le zinc, car l'effet a également lieu quand la soudure plonge dans l'huile privée d'air et d'eau.

Le circuit fer et cuivre donne toujours les effets précédemment indiqués, quels que soient le diamètre des fils et leur mode de contact, qu'ils soient soudés ou appliqués avec une forte pression ; mais il n'en est pas de même avec un circuit zinc et or, zinc et argent : les effets varient d'intensité suivant le diamètre des fils et leur mode de contact ; quelquefois même le premier courant est à peine sensible. Les circuits précédents sont les seuls qui aient présenté jusqu'ici de semblables effets ; car, dans les circuits formés d'autres métaux, l'intensité du courant croît proportionnellement à la température jusqu'à 100° au moins ; dans le tableau suivant, on en aura la preuve jusqu'à 40° :

MÉTAUX composant le circuit.	TEMPÉRATURE de l'une des soudures, l'autre étant à zéro.	DÉVIATION de l'aiguille aimantée.	INTENSITÉ du courant.	INTENSITÉ calculée.
Fer et cuivre.......	10	28	20	20
	20	41	40,70	40
	30	48	59,92	60
	40	»	»	80
Cuivre et platine....	10	18	10	10
	20	28	20	20
	30	36	30,28	30
	40	41	40,40	40
Argent et étain.....	10	28	20	20
	20	41	40,70	40
	30	48	59,92	60
	40	»	»	»
Cuivre et argent....	10	13	6,60	6,71
	20	22	13,30	13,42
	30	28	20	20,13
	40	34	27,20	26,84

Tous ces résultats ne sont pas comparables entre eux, attendu

que le pouvoir conducteur de chaque circuit n'est pas le même; ils ne peuvent donc servir à déterminer la relation existant entre les intensités des courants produits par différents circuits, et par conséquent le pouvoir thermo-électrique de chaque métal, c'est-à-dire, la faculté dont jouit chaque métal d'émettre telle quantité d'électricité, dans son contact avec un autre métal, à une température donnée. Pour remplir ce double but, on opère avec un circuit composé de fils de tous les métaux dont on veut trouver la faculté thermo-électrique. En ne changeant pas de circuit, la conductibilité est toujours la même, et les résultats deviennent comparables entre eux. Toutes les soudures sont maintenues à la température zéro, excepté celle sur laquelle on expérimente. Le tableau suivant présente les résultats obtenus avec un circuit composé de fils de huit métaux différents, chacun de deux décimètres de long, d'un demi-millimètre de diamètre, soudés avec soin bout à bout, et dont les extrémités communiquent à un multiplicateur à fil court :

DÉSIGNATION des soudures.	TEMPÉRATURE de la soudure soumise à l'expérience.	DÉVIATION correspondante de l'aiguille aimantée.	INTENSITÉ du courant électrique.
$\overset{+}{\text{Fer}}$, $\overset{-}{\text{étain}}$	20	36,50	31,24
$\overset{+}{\text{Cuivre}}$, $\overset{-}{\text{Platine}}$	20	16,00	8,55
$\overset{+}{\text{Fer}}$, $\overset{-}{\text{cuivre}}$	20	34,50	27,96
$\overset{+}{\text{Argent}}$, $\overset{-}{\text{cuivre}}$	20	4,00	2
$\overset{+}{\text{Fer}}$, $\overset{-}{\text{argent}}$	20	33	26,20
$\overset{+}{\text{Fer}}$, $\overset{-}{\text{platine}}$	20	39	36,07
$\overset{+}{\text{Cuivre}}$, $\overset{-}{\text{étain}}$	20	7	3,50
$\overset{+}{\text{Zinc}}$, $\overset{-}{\text{cuivre}}$	20	2	1,»
$\overset{+}{\text{Argent}}$, $\overset{-}{\text{or}}$	20	1	0,50

En comparant les intensités, on trouve que pour une température de 20°, chaque métal acquiert une puissance thermo-électrique telle, que l'intensité du courant produit au contact de deux métaux est

égale à la différence des quantités que représente chacune de ces puissances dans chaque métal. Ainsi, si l'on désigne cette puissance par p, on aura, pour l'intensité du courant, lorsqu'on élève la température de la soudure fer cuivre, p fer — p cuivre = 27,96 ; de même, pour le platine et le fer, p fer — p platine = 36,07 ; en retranchant la première expression de la seconde, on a p cuivre — p platine = 8,11, au lieu de 8,55 que donne l'expérience. La soudure fer étain donne 31,24 ; celle cuivre étain, 3,50 : la différence fer cuivre est donc 27,74 au lieu de 27,96 donné par l'expérience. Il est donc bien démontré que l'intensité d'un courant thermo-électrique est égale à la différence des actions thermo-électriques produites dans chaque métal, par la même température : essayons de déterminer chacune de ces actions.

Si l'on représente la puissance ou l'action thermo-électrique du fer à 20° par x, on a

p fer $= x$
p argent $= x - 26,20$
p or $= x - 26,70$
p zinc $= x - 26,96$
p cuivre $= x - 27,96$
p étain $= x - 31,24$
p platine $= x - 36$

Pour déterminer x, il faudrait pouvoir mesurer exactement l'intensité du courant produit quand on opère avec deux fils de fer faisant partie du même circuit et n'ayant pas la même température aux points de contact ; mais cette détermination présente de grandes difficultés.

Si l'intensité du courant croissait toujours proportionnellement à la température, les rapports précédents pourraient servir pour toutes les températures ; mais il n'en est pas ainsi : cela n'a lieu que pour celles qui sont inférieures à 100° en général.

Dans cet arrangement, chaque métal est positif par rapport à celui qui le précède. Si x était connu, le pouvoir thermo-électrique s'en déduirait ; mais comme le fer est positif par rapport à tous les métaux qui entrent dans le circuit, on peut en conclure que sa valeur, dans le cas actuel, est supérieure à 36.

D'un autre côté, l'or, l'argent et le zinc ont des pouvoirs à peu près égaux. Or, quand on cherche parmi les propriétés calorifiques, celles qui sont sensiblement les mêmes pour ces différents métaux, on ne

voit que les pouvoirs rayonnants qui s'y rapportent. En supposant donc que ces derniers soient proportionnels aux pouvoirs thermo-électriques, ce qui forcerait d'admettre que dans les circuits métalliques il y a au contact un rayonnement semblable à celui qui a lieu dans l'air, et que la différence des pouvoirs rayonnants est aussi une des causes qui influent sur le sens et l'intensité du courant, on parvient alors, mais pour ce cas-là seulement, à déterminer la valeur de x, car on a : $x : x - 26,70$ :: 15 : 12. 15,12 étant le pouvoir rayonnant du fer et de l'or, en tirant de cette proportion la valeur de x et la substituant dans les expressions p argent, p or, etc., on trouve :

p fer	133,50
p argent	107,30
p or	106,80
p zinc	106,54
p cuivre	106,54
p étain	102,26
p platine	97,50

Pour compléter l'exposé des rapports qui lient les propriétés physiques de l'électricité à celles de la chaleur, il nous reste à montrer jusqu'à quel point les pouvoirs conducteurs des corps, pour la chaleur et l'électricité, sont les mêmes. Il est nécessaire, pour cela, de s'appuyer, d'une part sur la loi qui exprime l'intensité du courant en fonction de la longueur et de la section du fil métallique qui le transmet; de l'antre, sur la loi de la propagation de la chaleur dans les corps. La loi qui fait connaître le pouvoir conducteur des métaux pour l'électricité, a été exposée avec de grands développements dans le *Traité de l'électricité et du magnétisme*, t. III, p. 3, ainsi nous ne reviendrons plus sur les méthodes employées pour l'obtenir; nous dirons seulement que le pouvoir conducteur est en raison inverse de la longueur des fils ou barres de même métal, et en raison directe de leur section.

Voici les pouvoirs électriques de dix métaux déterminés par plusieurs physiciens :

DÉSIGNATION des métaux.	POUVOIRS CONDUCTEURS (le platine étant 100), TROUVÉS PAR			
	DAVY. Électricité voltaïque.	BECQUEREL. Électricité voltaïque.	HARRIS. Électricité ordinaire.	POUILLET. Électricité fournie par un seul couple.
Argent........	600	447	500	602 pur.
Cuivre........	550	609	500	448 id.
Étain.........	109	94	83,5	»
Platine........	100	100	100	100
Or............	400	571	330	465 id.
Plomb........	380	50	41,5	»
Fer...........	82	95	100	de 70 à 81
Zinc..........	»	174	165,5	»
Mercure.......	»	21	»	12
Potassium.....	»	8	»	»

Les résultats obtenus présentent des différences souvent assez considérables que l'on doit attribuer non-seulement à la pureté plus ou moins grande des métaux employés, mais encore à la nature de la source d'où émane l'électricité ; car plus la tension est forte, plus l'électricité a de puissance pour vaincre l'inertie des mauvais conducteur. Il aurait donc fallu, pour que tous les résultats fussent comparables, que l'électricité employée eût la même tension.

Maintenant, si nous comparons ces résultats à ceux obtenus pour le pouvoir conducteur de la chaleur par M. Despretz, nous trouvons :

Or.............	1000.............	102
Platine..........	981..............	100
Argent...........	973..............	99
Cuivre...........	898,2.............	90
Fer.............	374,3.............	39
Zinc............	363,0.............	37
Étain...........	303,9.............	30
Plomb..........	179,6.............	18

Nous verrons qu'à part le platine qui n'est pas à son rang dans ce tableau, attendu que son pouvoir conducteur est réellement au-dessous de celui de l'argent et du cuivre, les substances qui conduisent le mieux l'électricité sont aussi les meilleurs conducteurs de la chaleur.

Des effets électriques produits par la chaleur dans les corps mauvais conducteurs et dans diverses substances minérales cristallisées.

Après avoir étudié les effets de la chaleur dans les corps conducteurs, nous devons examiner les effets produits dans les corps mauvais conducteurs, en ne perdant pas de vue ce que nous avons dit sur les relations qui existent entre la chaleur et l'électricité. Nous avons vu que lorsque l'on présente un corps électrisé à un autre qui ne l'est pas, l'électricité naturelle de celui-ci est décomposée; l'électricité de signe contraire à celle de l'autre est attirée, tandis que celle de même nom est repoussée dans la partie la plus éloignée : cette décomposition s'opère avec d'autant plus de facilité que le corps est meilleur conducteur. D'un autre côté, on sait que la chaleur, en pénétrant dans les substances conductrices, diminue leur pouvoir conducteur pour l'électricité, tandis qu'elle l'augmente dans le verre, la gomme laque et autres corps mauvais conducteurs; il résulte de là qu'en échauffant ces derniers, on facilite la décomposition du fluide naturel par l'influence d'un corps électrisé. Lorsque l'on soumet ces corps à cette influence, il se produit donc, pendant l'échauffement ou le refroidissement, des phénomènes électriques de décomposition dépendant du pouvoir conducteur de ces mêmes corps. De plus, quand on chauffe au rouge l'un des bouts d'un fil de platine, ce bout prend un excès d'électricité positive, l'autre bout un excès d'électricité négative. Il est infiniment probable que les deux excès vont en diminuant d'intensité jusqu'au milieu, qui doit être à l'état neutre.

Voyons ce qui se passe dans les mêmes circonstances avec un corps mauvais conducteur. Voici l'appareil qui sert à faire cette expérience : on prend une cloche de verre ayant une tubulure dans laquelle passe une tige munie d'une pince dans laquelle est fixé le bout d'un fil de cocon qui descend dans la cloche, que l'on pose sur une lame de métal dont on élève la température au moyen d'une lampe à alcool placée au-dessous. Au bout du fil de cocon se trouve une chape en papier, fixée au moyen d'un nœud, et dans laquelle on place un petit tube de verre très-peu hygrométrique, de 1 millimètre de diamètre et de 1 à 2 centimètres de longueur; à la température ordinaire, quand les

parois de la cloche sont parfaitement desséchées, et que l'on présente au petit tube un bâton de gomme laque électrisé, ce petit tube est attiré rapidement par suite de la décomposition de son fluide neutre. Il n'en est plus de même quand la cloche est recouverte d'une couche d'eau hygrométrique : en élevant la température, il ne se manifeste aucun effet que lorsque cette eau est enlevée. Mais si, à 25° environ, on éteint la lampe, le petit tube est attiré aussitôt, et continue à l'être tant que dure le refroidissement. En élevant de nouveau la température jusqu'à 30°, non-seulement le tube est attiré, mais il acquiert encore la polarité électrique, qui disparaît presque aussitôt que le corps électrisé est retiré; tandis que si on la fait naître au moment où l'on éteint la lampe, elle persévère pendant plus ou moins de temps, même quand la température est portée à 100 ou 150°. La polarité ne s'établit donc dans le tube, sous l'influence du corps électrisé, qu'au moment où le thermomètre commence à baisser; elle dure ensuite pendant une partie du refroidissement. Mais si, à un instant quelconque, on élève la température du milieu où se trouve le petit tube de verre, la polarité disparaît aussitôt. Telle est l'influence de la dilatation et de la contraction sur les effets électriques produits par influence dans le verre; effets que nous retrouverons dans certaines substances cristallisées, qui deviennent électriques par élévation de température.

Tous les verres ne sont pas propres à ces expériences : ceux qui sont trop alcalins ne conservent que difficilement la polarité; dans la gomme laque, par exemple, elle est très-difficile à établir. En général, il faut que les corps mauvais conducteurs, en s'échauffant, condnisent assez bien pour que la décomposition du fluide électrique s'effectue avec une certaine facilité.

Il semblerait résulter de ces faits que lorsqu'un corps se dilate, il ait besoin de prendre de l'électricité aux corps environnants, tandis que l'inverse a lieu quand il se contracte; il tendrait alors, au contraire, à laisser dégager de l'électricité.

Quelques substances minérales présentent des effets qui ont de l'analogie avec les précédents, avec cette différence toutefois qu'ils sont produits spontanément par l'élévation ou l'abaissement de température, sans qu'il soit besoin, par conséquent, d'avoir recours à l'action par influence d'un corps électrisé : nous voulons parler des effets électriques de la tourmaline, de la topaze, et de plusieurs autres substances minérales cristallisées.

L'étude de ces effets est d'autant plus importante que l'on a con-

sidéré les corps comme composés d'atomes possédant une polarité électrique, envisagée comme la cause des affinités.

L'appareil (fig. 24, pl. VI) est celui qui nous a paru le plus convenable pour observer les effets électriques de la tourmaline et des substances qui sont prismatiques : il se compose d'une cloche en verre *cc*, ouverte par les deux bouts, et reposant sur une plaque de cuivre *pp*, qu'on échauffe au moyen d'une lampe à alcool *l*. Un fil de coton fixé en *f*, et portant une chape de papier, descend dans la cloche ; deux tiges verticales en métal *tt*, placées à une distance un peu plus grande que la longueur de la tourmaline, communiquent chacune avec l'un des pôles d'une pile sèche, dont l'intensité peut être considérée comme sensiblement constante pendant la durée d'une expérience. On met la tourmaline dans la chape, et on allume la lampe pour échauffer la plaque et l'intérieur de la cloche, dont on connaît la température au moyen d'un thermomètre convenablement placé. A mesure que l'intérieur de la cloche s'échauffe, la température de la tourmaline s'élève, et aussitôt qu'elle devient électrique elle se place entre les deux tiges, les deux pôles inverses en regard ; et si on la dérange de cette position, elle y revient en exécutant une suite d'oscillations dont le nombre, dans un temps donné, sert à déterminer l'intensité de l'électricité.

Voici les résultats obtenus avec une tourmaline brune, légèrement translucide, de 3 centimètres de longueur et de 3 millimètres de diamètre, dont on a élevé graduellement la température :

A 30° degrés la polarité électrique a commencé à être sensible, et le cristal s'est placé entre les deux pôles ; elle a continué jusqu'à 150° et même au delà. On a éteint la lampe, la température montait encore pendant quelques instants, en raison de la chaleur acquise par la plaque métallique ; mais ensuite elle est devenue stationnaire : la polarité a disparu alors et a reparu en sens inverse, dès l'instant que la température a commencé à baisser.

Le moment du passage d'une polarité à une autre a été très-court ; les résultats obtenus sont consignés dans le tableau suivant :

TEMPÉRATURE de la tourmaline.	DURÉE des oscillations.	NOMBRE des oscillations.	INTENSITÉS.
100	30	0	
90	30	10	0,11
80	»	13	0,19
70	»	15	0,25
60	»	15	0,25
50	»	15	0,25
40	»	14	0,21
30	»	13	0,19
20	»	7	0,054

Interprétons ces résultats : la température avait été portée à 115°; à 105°, la tourmaline, quoiqu'elle fût électrique auparavant, a commencé à se fixer entre les deux tiges verticales qui communiquaient avec les deux pôles de la pile sèche ; à 100°, les oscillations étaient mesurables. Depuis 115° jusqu'à 100°, moment où le refroidissement était le plus rapide, l'intensité électrique croissait très-lentement ; de 100° à 90°, l'accroissement de l'intensité a été rapide, puis il l'a été moins jusqu'à 70°; de 70° a 40°, il est resté sensiblement stationnaire; de 40° à 20°, il a diminué dans la même proportion qu'il avait augmenté depuis 100° jusqu'à 70°. La polarité électrique a disparu entièrement à 15°, quoiqu'elle n'eût commencé à paraître qu'à 50°, quand on a élevé la température. Plusieurs tourmalines ont donné des résultats semblables. On voit donc que l'intensité électrique de chaque pôle n'est pas en raison directe de la vitesse du refroidissement. La loi des variations de l'intensité électrique, qui est très-compliquée, dépend probablement du pouvoir conducteur de la tourmaline, et de la force coercitive des parties constituantes, laquelle force s'oppose à la recomposition immédiate des deux électricités. Il n'y a pas d'autre moyen d'expliquer, en effet, pour quel motif la tourmaline est encore électrique par un refroidissement lent à 15°, tandis qu'elle ne le devient qu'à 50° quand on la chauffe. D'un autre côté, s'il est facile de mesurer l'intensité électrique de la tourmaline pendant son refroidissement, il n'en est pas de même lorsqu'on élève la température,

attendu que son état électrique change avec une assez grande rapidité.

Dans le tableau précédent, nous avons donné le nombre des oscillations produites dans trente secondes. Pour remonter à l'intensité de la force qui les a produites, on peut considérer la tourmaline suspendue comme deux pendules, dont le point de suspension serait le milieu de cette pierre, et qui oscilleraient de chaque côté du conducteur en relation avec les pôles de la pile sèche ; dès lors, les intensités de la force électrique de la tourmaline seraient en raison inverse du carré du temps de chaque oscillation. En partant de cette supposition, on aura pour les rapports des forces électriques les nombres suivants :

de 100° à 90°	=0,11
de 90 à 80°	=0,19
de 80 à 70°	=0,25
de 70 à 60°	=0,25
de 60 à 50°	=0,25
de 50 à 30°	=0,16
de 30 à 20°	=0,054

On voit par là comment diminue l'intensité de la force électrique par le refroidissement.

Dès l'instant que les effets électriques produits dans la tourmaline par l'élévation de température sont inverses de ceux que donne l'abaissement de température, il en résulte que, si les deux extrémités ne se refroidissent pas en même temps, ou bien qu'il y ait élévation d'un côté et abaissement de température de l'autre, il pourra se faire que l'état électrique de la tourmaline varie de six manières différentes, savoir :

A l'un des pôles,	à l'autre.
(+)	(—)
(+)	(+)
(—)	(—)
(+)	(0) au passage.
(—)	(0)
(—)	(+)

Le premier état a lieu lorsque toute la surface de la pierre est exposée également à un refroidissement ou à un échauffement.

Il en est de même du dernier.

Quant au second et au troisième, ils se produisent lorsque l'un

des pôles seulement est dans un état de refroidissement, tandis que l'autre est dans un état d'échauffement. Relativement au quatrième et au cinquième, ils se présentent toutes les fois que l'un des pôles se trouve dans un état d'échauffement ou de refroidissement, et l'autre dans un état stationnaire. Voyons ce qui se passe quand l'une des extrémités reçoit plus de chaleur que l'autre; il faut pour cela enfermer chaque bout de la tourmaline dans un petit tube de verre fermé à un bout, et qui s'applique aussi exactement que possible dessus, puis l'assujettir par son milieu au moyen d'un fil de platine à un petit tube de verre. Si l'on chauffe l'un des bouts, par exemple, celui qui est positif par échauffement, le verre commencera par prendre de la chaleur qu'il communiquera à la tourmaline. Dans ce cas, tant que la température ne commencera pas à s'élever à l'autre bout, la tourmaline ne manifestera qu'une seule électricité, comme on peut s'en assurer en présentant successivement tous les points de la tourmaline au disque de clinquant d'un électroscope de Coulomb possédant l'une des deux électricités. La tourmaline, dans ce cas, ne possède donc qu'une espèce d'électricité, et l'autre doit se trouver très-probablement sur la surface du tube de verre en contact avec le bout électrisé.

M. Forbes a trouvé un cristal de tourmaline dont la structure paraissait régulière à la vue, qui jouissait de la singulière propriété de présenter, en se refroidissant, un pôle d'électricité positive à chaque extrémité. Au moyen du plan d'épreuve de Coulomb, il a trouvé que la portion centrale du cristal possédait un excès d'électricité négative. Tout porte à croire que ce cristal était une macle, c'est-à-dire un cristal formé de deux autres, accolés par les faces symétriques et possédant la même polarité électrique.

Revenons maintenant au bout positif, où l'on a supposé la température croissante. Aussitôt qu'elle est devenue stationnaire, l'état électrique de la tourmaline cesse pour reparaître en sens inverse aussitôt qu'elle commence à baisser.

Dans le même temps, le côté négatif, suivant que sa température est demeurée constante ou a éprouvé des variations, devient nul, négatif ou positif.

Ces faits prouvent bien que, lorsqu'on échauffe inégalement les deux côtés d'une tourmaline, ils prennent chacun un état électrique indépendant de l'autre.

On a examiné le cas où la température était croissante à l'extrémité positive, et dans un état stationnaire au bout opposé. Pour obtenir constamment cette dernière condition, il suffit de mettre ce bout

dans un petit tube rempli de glace; on obtient alors les effets indiqués précédemment.

M. Forbes, qui a fait quelques expériences pour mesurer l'intensité des effets électriques de la tourmaline, s'est servi de l'électroscope de Coulomb, dont la cloche était pourvue d'un tube adapté à sa paroi, et dans lequel on introduisait la pierre pour la faire réagir sur le disque préalablement électrisé.

Ce mode d'expérimentation renferme plusieurs causes d'erreur, entre autres la perte d'électricité qu'éprouve continuellement le disque de clinquant. Mais M. Forbes a cherché à en diminuer les effets en expérimentant peu de temps après que le disque eut reçu sa charge. Il a répété, en outre, chacune de ses séries dans un ordre inverse, afin d'obtenir deux observations également éloignées de l'état moyen de la tension électrique de la tourmaline. La moyenne est la valeur cherchée. Les déviations du disque ne peuvent servir à comparer les diverses charges de la tourmaline qu'autant qu'on les rapporte à une déviaton constante, en tordant convenablement le fil de torsion. Nous préférons donc le moyen précédemment décrit.

L'intensité électrique des tourmalines varie tellement dans les cristaux provenant de la même localité, que l'on est porté à attribuer ces variations à des différences dans leur dimension, leur structure, et particulièrement leur couleur; mais pour bien apprécier l'influence de ces différentes causes, il est nécessaire de faire connaître un mode d'expérimentation qui permette de reconnaître immédiatement si une tourmaline est fortement électrique ou non, et qui consiste à varier le mode d'échauffement et de refroidissement, qui peut être lent ou rapide; commençons par le premier.

Celui-ci s'obtient, comme nous l'avons déjà dit, en élevant graduellement la température de la cloche dans laquelle est suspendue la pierre, éteignant la lampe et laissant le refroidissement s'opérer. Le deuxième mode consiste à transporter la tourmaline, qui est à une température basse, dans un milieu où elle est très-élevée, et a observer ce qui se passe pendant qu'elle s'échauffe rapidement. On la retire ensuite pour la reporter dans un lieu froid. Les tourmalines qui jouissent de la faculté électrique au plus haut degré l'acquièrent par ces deux modes, tandis que celles qui sont peu électriques ne le deviennent que par le deuxième seulement; il y en a qui ne le sont par aucun de ces deux modes.

Tous les faits exposés jusqu'ici prouvent bien que les effets électriques de la tourmaline sont le résultat de la dilatation et de la con-

traction, et que, lorsque la température est stationnaire, il n'y a aucun effet électrique produit. Si nous nous reportons aux effets de clivage, nous trouverons analogie dans les résultats. Dans le cas actuel, la chaleur, à mesure qu'elle est communiquée, dilate les parties, opère une espèce de clivage, et doit mettre en liberté, sur les deux faces en regard, les deux électricités. Nous verrons plus loin comment ce dégagement peut produire les effets observés.

Il est bien démontré maintenant par les expériences précédentes que la polarité électrique des atomes sous l'influence de la chaleur, cause supposée des affinités, ne saurait exister, puisque cette polarité cesse d'avoir lieu quand la température est stationnaire. Les affinités ne s'exerceraient pas dans ce cas-là; ce qui ne peut être admis. Continuons à décrire les effets électriques produits dans les tourmalines de différentes dimensions, de diverses couleurs ou incolores.

Une tourmaline extrêmement peu translucide sur les bords, de 8 centimètres de longueur et de 2 millimètres de diamètre, n'est devenue électrique par aucun des modes d'excitation indiqués. Une tourmaline de 6 centimètres et demi de long, et d'une grosseur à peu près égale à la précédente, n'est devenue électrique que par le deuxième mode, en passant rapidement de 12° à 60°. Par un refroidissement lent, elle n'a manifesté la polarité électrique qu'à 60°, bien qu'on ait porté la température à 100°.

Un grand nombre de tourmalines de diverses longueurs nous ont donné des résultats d'autant plus forts qu'elles étaient plus petites. De même nous avons trouvé que des fragments de tourmaline donnaient constamment des effets plus marqués que la pierre dans son entier. Ainsi une tourmaline de 50 millimètres de longueur et de 5 millimètres de diamètre n'était électrique que par un échauffement rapide de 12° à 50°; ayant été brisée en deux parties, chacune d'elles l'est devenue par un échauffement lent. Enfin une tourmaline non électrique ayant été partagée en deux, les deux fragments ont donné ensuite des signes d'électricité. Ces faits tendent donc à prouver que les phénomènes électriques de la tourmaline varient en raison de la longueur et de la grosseur. Si cette loi s'applique à des tourmalines de plus en plus petites, il s'ensuivrait que les molécules intégrantes acquerraient une polarité électrique très-intense par de faibles variations de température.

M. Forbes a obtenu des résultats différents des précédents. Il a soumis à l'expérience une tourmaline de 3 pouces et demi environ de long et de un quart de pouce de diamètre, par conséquent un peu

plus longue que celle qui m'avait servi; il ne l'a pas trouvée réfractaire par élévation et abaissement de température. Dans une série d'expériences qu'il a faites sur six tourmalines de 1,3 pouce de long, et dont les épaisseurs ou les aires de section étaient comme des nombres 14, 11, 7, 6 et 4, il n'a trouvé aucun rapport direct avec les aires; car les intensités étaient représentées par 1, 2, 5, 4, 3. D'autres séries faites avec une suite de cristaux de 1,2 et 1,8 pouce de long, ont donné également des indications irrégulières. Néanmoins M. Forbes avoue que les dimensions de la section ont ordinairement une influence telle, que là où les différences sont considérables, le cristal le plus gros a presque toujours le plus grand pouvoir.

Un cristal de 1 pouce et quart de long avait son maximum d'intensité à 45° de déviation; l'ayant brisé aussitôt à un quart de sa longueur, les deux portions furent chauffées et soumises de nouveau à l'expérience : la moyenne de la plus grande portion a donné une déviation égale à 47°, et celle de la plus petite une déviation égale à 43°. M. Forbes pense que la diminution dans la longueur ne paraît pas favorable au développement de l'électricité; conséquence qui est encore en contradiction avec celle que nous avons tirée de nos expériences. Pour bien s'assurer de l'influence des longueurs, il a réuni plusieurs tourmalines d'un diamètre de $\frac{1}{10}$ de pouce, et dont les sections étaient aussi égales que possible. Il a trouvé les résultats suivants :

Numéros.	Longueur.	Intensité.
1	3,25	79°
2	2,10	82
3	1,60	60
4	1,55	60
5	1,35	89
6	1,19	68

Ces nombres nous montrent bien que le cristal le plus long tient un rang élevé parmi ceux d'égale section, et qu'il ne paraît pas exister de rapport entre la longueur et l'intensité; mais ce tableau ne peut servir à donner la loi des longueurs, puisqu'on sait que les propriétés électriques varient d'une pierre à une autre. Pour étudier les changements qu'éprouvent les propriétés électriques de la tourmaline en faisant varier la longueur, M. Forbes a formé une pile en superposant des plaques de tourmaline. Nous ne concevons pas comment cet arrangement pourrait donner des indications satisfaisantes, car les propriétés électriques de la tourmaline sont tellement

variables en raison de la forme, de la couleur et d'autres causes que nous signalerons plus loin, qu'elles doivent présenter encore de bien plus grandes anomalies quand on applique les unes sur les autres des plaques de tourmaline laissant entre elles des interstices qui s'opposent naturellement au dégagement et à la distribution de l'électricité.

Nous devons signaler une propriété importante de la tourmaline, que l'on a reconnue dès l'instant que l'on a commencé à étudier ses effets électriques. Quand cette pierre est électrisée par échauffement ou refroidissement, si l'on vient à la briser en un point quelconque, chaque partie séparée manifeste un état électrique opposé, de sorte que chaque moitié possède encore la polarité électrique. Cet effet ne peut avoir lieu qu'autant que les deux électricités, qui deviennent libres dans chaque moitié, étaient dissimulées dans le cristal entier dans le plan même de section. Nous verrons plus loin le parti que l'on peut tirer de ce fait pour expliquer les effets électriques de la tourmaline. Cette dernière n'est pas la seule des substances minérales cristallisées qui jouisse de la propriété électrique par élévation ou abaissement de la température. Haüy a reconnu que cette propriété existe encore dans les substances dont les cristaux dérogent à la loi de symetrie, c'est-à-dire dont les parties opposées correspondantes ne sont pas semblables par le nombre, la disposition et la figure de leur face, et que le sommet qui est le plus chargé est celui qui manifeste l'électricité positive par refroidissement. Les substances dans lesquelles on a reconnu la faculté électrique, sont : la topaze, la boracite, le mésotype, le silicate de zinc, le sphène, l'axinite, la phrénite. Quelques détails sur leur forme et leur clivage ne seront pas inutiles, attendu que leurs propriétés électriques résultent en quelque sorte de l'une et de l'autre. La tourmaline, par exemple, se présente sous diverses formes dont le type principal est un rhomboèdre. La variété isogone de Haüy est un prisme à neuf pans, terminé d'un côté par un sommet à six faces, dont trois appartiennent à la forme primitive, et du côté opposé, par un sommet à trois faces, qui sont les analogues des faces appartenant à la forme primitive. Dans cette variété, comme dans les autres, la loi de symétrie ne se vérifie pas, à moins d'admettre l'explication de M. Lafosse, rapportée p. 280. La tourmaline a une cassure transversale, concoïde dans tous les sens; dans certains cristaux on aperçoit des joints naturels, indices de lames superposées. Cet état de choses ne peut nous initier en rien sur la manière dont l'électricité s'est dé-

gagée au moyen de la chaleur. Il n'en est pas de même dans la topaze qui se présente en prismes rhomboïdaux, simples ou modifiés par d'autres prismes, et clivables par un plan perpendiculaire à l'axe, à l'extrémité duquel se trouvent les pôles électriques.

Pour observer ces propriétés électriques, on opère comme avec la tourmaline, attendu que les prismes sont souvent allongés; seulement il faut élever la température jusqu'à 50° ou 60° pour observer les propriétés électriques par refroidissement. Or, nous savons que lorsque l'on clive une topaze dans le sens perpendiculaire à l'axe, les deux faces séparées se trouvent dans deux états électriques différents; il résulte de là que la chaleur, en dilatant les parties, doit opérer également un clivage. Dans un instant, nous verrons le parti que l'on peut tirer de cette comparaison pour concevoir la distribution de l'électricité dans les cristaux dont il est question ici.

La boracite, autrement dit magnésie boratée, exige des précautions particulières pour reconnaître son état électrique. Cette substance se présente à nous sous la forme d'un cube, modifié la plupart du temps sur les arêtes et sur les angles solides, de telle sorte que ces derniers dérogent complétement à la loi de symétrie. Cette substance n'est pas susceptible de clivage, mais les joints naturels peuvent être aperçus à une vive lumière. Elle est électrique par la chaleur en huit points opposés deux a deux, les pôles opposés se trouvant à l'extrémité d'une grande diagonale. Ce grand nombre de pôles distribués sur un petit cristal qui n'a ordinairement que quelques millimètres de côté, rend très-difficile leur détermination, si l'on ne se met en garde contre les effets contraires produits par les pôles voisins. Voici le procédé qui réussit le mieux : on prend un électroscope disposé de la manière suivante : sur quatre tubes verticaux en verre on place un disque de verre, au centre duquel est fixé un fil de cocon, au bas duquel se trouve un petit levier avec son disque de clinquant comme dans l'électroscope de Coulomb. Cette disposition permet de présenter successivement au disque toutes les faces du petit cristal. On assujettit le cristal à un anneau formé avec un fil de platine que l'on fixe lui-même à un tube de verre d'un très-petit diamètre, en évitant que l'anneau ne touche les angles. Après avoir fait chauffer la pierre, on n'éprouve aucune difficulté à présenter successivement ses sommets au disque du clinquant, sans craindre que des corps conducteurs exercent une action attractive sur le disque. Les effets électriques de chaleur dans la boracite sont beaucoup plus faibles que dans la tourmaline. Pour les observer, il faut

du soin, surtout pour les actions répulsives qui n'ont lieu que dans un très-petit espace.

L'axinite, qui a pour forme primitive un prisme droit irrégulier à base obliquangle, jouit également de la pyro-électricité, du moins quelques cristaux. Haüy a trouvé qu'il n'y avait que ceux dérogeant à la loi de symétrie qui devenaient électriques par la chaleur.

La mésotype a pour forme primitive un prisme droit rhomboïdal, qui se subdivise diagonalement. Suivant Haüy, il n'y a qu'une partie des cristaux de cette substance qui possède la propriété pyro-électrique; il n'a pu néanmoins déterminer d'une manière précise les différences de configuration entre les parties dans lesquelles résident les deux pôles électriques.

La phrénite a pour forme primitive un prisme droit rhomboïdal, divisible dans le sens des petites diagonales des bases. Haüy admet encore son état électrique. Mais il en est de cette substance comme de la précédente; n'ayant pu prouver le défaut de symétrie, il n'a fait que le soupçonner.

Silicate de zinc. Cette substance, dont la forme primitive est un octaèdre rectangulaire, se présente en prismes hexaèdres, à sommets dièdres et qui jouissent de la pyro-électricité à un degré bien marqué. Haüy n'a fait également que soupçonner un défaut de symétrie dans les cristaux; il a annoncé, en outre, que ce minéral n'avait pas besoin d'être chauffé pour donner des signes d'électricité, attendu que ces signes se manifestaient encore par un froid de 6° Réaumur au-dessous de zéro. Ayant placé un petit fragment de cristal dans un milieu dont la température était de 11° au-dessous de zéro, et l'y ayant laissé pendant quelques instants, il reconnut qu'il était électrique; il se trouvait alors dans un état de refroidissement. L'ayant porté dans une pièce ou le thermomètre marquait 5° au-dessus de zéro, il trouva que l'action polaire diminuait et était devenue nulle: dans ce cas, le cristal avait repris peu à peu la température du milieu ambiant. L'ayant approché du feu, la polarité reparut en sens inverse. Ces effets étaient tout naturels, puisqu'il y avait échauffement.

Sphène. La forme primitive de cette substance est un octaèdre rhomboïdal; il paraît, d'après M. Haüy, qu'il n'y a qu'une partie des cristaux qui soient électriques. Pour développer cette faculté, il faut les chauffer très-peu. M. Haüy a trouvé dans les cristaux qui la possèdent un défaut de symétrie.

M. Forbes, qui a étudié la pyro-électricité de la topaze, de la boracite, de la mésotype, a trouvé, conformément à la loi que nous avions observée, que l'intensité de l'électricité atteint son maximum quand la vitesse du refroidissement est devenue comparativement plus faible. Il a observé aussi que la topaze possède la propriété de conserver son électricité longtemps après que la température a cessé d'éprouver des changements. Cet effet dépend uniquement de la conductibilité de la pierre; car on conçoit qu'il puisse très-bien se faire que la pierre devenant moins conductrice, à mesure que la chaleur diminue, la recomposition des deux électricités mette plus de temps à s'effectuer.

Le physicien anglais a conclu de ses expériences que, dans tous les minéraux, la difficulté de décomposition et de recomposition augmente avec la masse; de là vient que les plus petits cristaux sont plus facilement excités, et que les effets sont plus permanents. Ainsi, dans un long cristal de boracite ayant un tiers de pouce de côté, ce cristal présentait des résultats analogues quand on présentait à l'électroscope un de ses quatre pôles négatifs, le disque s'éloignant lentement et d'une manière régulière à mesure que le refroidissement s'opérait, et au bout de dix minutes, il atteignait son maximum de tension; la diminution d'électricité était ensuite très-lente : en trois quarts d'heure, le disque ne s'était que très-peu approché de sa première position. Un petit cristal de boracite, traité de la même manière, atteignait rapidement le maximum, et l'aiguille, dans une des expériences, retourna à zéro au bout de vingt minutes; dans une autre, au bout d'une demi-heure. Les cristaux aciculaires de mésotype atteignaient avec facilité un haut degré d'excitation électrique, de sorte qu'il fallait une grande attention pour découvrir si le maximum d'intensité n'avait pas lieu immédiatement.

Tâchons maintenant de remonter aux causes d'où dépendent les propriétés électriques de la tourmaline et autres substances, en nous appuyant sur les principaux faits précédemment décrits. Dans un prisme de tourmaline devenue électrique, la tension de l'électricité libre va en décroissant depuis chaque bout jusqu'au milieu, qui est à l'état 0. D'un autre côté, l'expérience nous a appris que le clivage des cristaux constituait chaque partie séparée dans un état électrique différent, et qu'il était permis d'en conclure qu'il en serait encore de même si l'on séparait deux molécules l'une de l'autre; que la chaleur devait donner lieu à des effets de ce genre. Or nous possédons un appareil qui nous présente, grossièrement à la vérité, les effets des

pierres électriques : c'est la pile électrique, formée d'un certain nombre de plaques de verre, armées d'une feuille d'étain sur chacune des deux faces, et disposées parallèlement les unes aux autres, de sorte que la face b de la première communique, au moyen d'un fil métallique, à la face en regard a' de la seconde; la face b', de celle-ci à la face a'' de la troisième, et ainsi de suite jusqu'à la dernière, dont la face b^n communique avec le sol. Lorsque cet appareil est isolé, si l'on fait communiquer la face a avec le conducteur d'une forte machine, et qu'après l'avoir électrisée on rompe les communications entre le conducteur et le sol, au bout d'un certain temps les deux faces extrêmes a et b^n de cette pile possèdent un excès d'électricité contraire, et chaque moitié de la pile, une électricité également contraire, dont l'intensité va en diminuant jusqu'à la lame du milieu, qui est à l'état neutre. Voici comment M. Biot a analysé ces effets :

La face a possède une charge électrique en partie libre, en partie dissimulée par l'électricité de nature contraire qui est fixée sur la face b; il en est de même de la face a' par rapport à la face b', et ainsi de suite jusqu'à la dernière. L'excès d'électricité libre décroît rapidement d'un élément à un autre.

Si l'appareil était isolé, il n'y aurait aucun changement dans son état électrique; mais comme il se trouve dans un milieu qui enlève à chaque surface une quantité d'électricité proportionnelle à l'excès qui est libre sur chaque face, il en résulte que cette perte sera plus grande pour la face a que pour la face a', et ainsi de suite jusqu'à la face b^n qui n'a pas d'électricité libre. Il résulte de cet état de choses que a ayant perdu une portion de son électricité libre, ne pourra plus neutraliser sur b la quantité qui s'y trouvait auparavant. Il en est de même à l'égard de b', et de même pour les faces a'', a''', jusqu'à la dernière b^n qui ne se trouvera plus alors avoir son électricité complétement neutralisée, de sorte qu'une portion deviendra libre. Cette portion, d'abord très-petite, augmentera successivement, et perdra également par l'action absorbante de l'air, mais moins que les portions libres des autres lames, puisqu'elle est d'abord très-faible; mais la perte d'électricité libre diminuant de plus en plus sur la première face et augmentant sur la dernière, et les lames intermédiaires éprouvant des effets semblables, il en résultera que les électricités des faces extrêmes arriveront à l'égalité, et posséderont, par conséquent, deux électricités égales et de signe contraire, lesquelles iront graduellement en décroissant jusqu'au centre où il n'y aura pas d'électricité libre. En rompant la pile en un endroit quelconque, on sépare les

deux électricités qui étaient dissimulées; de sorte qu'on aura sur chaque face séparée une certaine quantité d'électricité libre, de nature contraire à celle de l'extrémité correspondante.

La tourmaline, la topaze, etc., nous présentant des effets absolument semblables, on doit rechercher si la cause indiquée précédemment n'interviendrait pas dans la production de ces effets. La topaze, par exemple, n'a qu'un sens de clivage perpendiculaire à l'axe de cristallisation; si l'on enlève une lame, elle prend un excès d'électricité contraire à celui qu'acquiert la face en regard, et cela quel que soit l'endroit où l'on opère le clivage : c'est donc une disposition semblable à celle de la pile électrique. Cela posé, lorsqu'on élève la température du cristal, on écarte les lames dont l'épaisseur est celie d'une molécule; on doit avoir alors un dégagement d'électricité analogue à celui obtenu dans clivage; de sorte que la substance conduisant mal, il peut se former une pile semblable à celle que nous venons de décrire, en admettant que chaque molécule, par l'effet du refroidissement ou de l'abaissement de température, possède deux pôles électriques contraires ; que l'espace intersticiel remplace la tige métallique, et que le système cristallin soit tel que l'une des faces de chaque lame renferme les pôles de même nom et la face en regard les pôles d'électricité contraire.

Ce qui tend encore à assimiler la topaze et les cristaux électriques aux piles électriques, ce sont les effets produits quand on brise la pile ou une topaze. Chaque partie séparée manifeste encore une électricité de signe contraire, comme si ces deux électricités étaient dissimulées avant la rupture.

Le même raisonnement s'applique à tous les autres cristaux autres que la topaze, dans lesquels le clivage n'est pas aussi net que dans celle-ci; car, bien que ce clivage n'existe pas toujours, on conçoit cependant, d'après les idées que nous possédons sur la cristallisation, que la nature ait employé un mode de superposition semblable; seulement, nos moyens mécaniques sont insuffisants pour opérer la séparation de ces lames.

Voilà tout ce que nous pouvons dire pour l'instant sur la cause du dégagement de l'électricité par élévation ou abaissement de température dans certaines substances minérales cristallisées. Avant de quitter ce sujet, nous ne devons pas oublier de parler des expériences que M. Brewster a faites dans le but d'étendre le nombre des substances électriques par la chaleur; nombre qui, suivant lui, est considérable. Il range parmi les substances pyro-électriques le spath

calcaire, le sulfate de baryte, le carbonate de plomb, le spath-fluor, plusieurs sulfates, le diamant, l'améthyste, le soufre, le sucre, etc. Il suffit d'indiquer le procédé de M. Brewster pour montrer qu'il a été induit en erreur sur la cause du phénomène. Ce physicien avait pris une membrane végétale excessivement mince, très-sèche, de l'*arundo phragmite*, dont il coupa plusieurs lanières; il observa qu'elles adhéraient au nombre de deux, de trois, au cristal dont il élevait la température. De ce qu'il y avait adhérence, il en a conclu que les cristaux étaient électrisés. Or, cette épreuve est insuffisante; en effet, lorsqu'on veut savoir si un corps est électrisé, il faut s'assurer de deux choses : 1° s'il attire les corps légers qu'on lui présente; 2° si ces corps sont repoussés immédiatement après le contact. Toutes les fois qu'il y a attraction seulement, on ne peut en conclure que le corps soit électrisé; car on sait qu'un corps qui a été chauffé exerce plusieurs genres d'action sur les corps légers qui se trouvent à la température ordinaire. D'après cela, nous ne pouvons admettre, sans de nouvelles épreuves, la pyro-électricité des substances indiquées par ce physicien.

Des effets de chaleur produits dans les corps par le passage de l'électricité.

Lorsqu'un cours d'eau, animé d'une certaine vitesse, trouve sur son passage une masse de sable dans lequel il peut s'étendre, l'eau s'écoule dans les interstices sans déranger la position des grains de sable; mais si la quantité de mouvement dont ce cours d'eau est animé est assez considérable, alors la masse est rompue en divers points : de même aussi, quand l'électricité pénètre dans une masse métallique, elle s'insinue dans tous les espaces intermoléculaires, comme le fait l'eau dans le sable; car, pour elle, les corps sont criblés d'un nombre infini de vacuoles; si elle peut s'étendre sans difficulté, les molécules ne perdent pas leur position naturelle; dans le cas contraire, il n'en est pas ainsi; les molécules éprouvent une résistance qui est proportionnelle au carré de la vitesse; et il en résulte des effets de chaleur qui doivent être d'autant plus grands que cette vitesse est plus considérable.

Nous savons, d'un autre côté, que lorsque la chaleur se propage dans un circuit métallique fermé, au point où elle trouve un obstacle, les deux principes électriques apparaissent aussitôt; l'électricité positive franchit l'obstacle; d'où résulte un courant électrique qui va de la partie chaude à la partie froide. Nous voyons par là que la réciproque a également lieu, attendu que le fluide électrique, quand

il circule dans un corps, se change en chaleur là où il rencontre un obstacle qui s'oppose à sa libre circulation. Nous ne connaissons encore à cette règle qu'une seule exception, dont la découverte est due à M. Peltier, et dont il sera question ci-après.

Les effets calorifiques produits par l'électricité sont tellement variés que nous devons mettre de l'ordre dans leur exposition, si nous voulons les coordonner ensemble, de manière à les rapporter à quelques principes généraux.

L'électricité se présente ordinairement à nous sous deux états : à l'état d'électricité libre ou à l'état de courant. Nous devons par conséquent étudier les effets de chaleur dans l'un et l'autre état.

Le passage de l'étincelle électriqne dans l'air est accompagné d'effets calorifiqnes, qui sont rendus sensibles au moyen du thermomètre de Kinnersley ; ainsi, l'électricité ne peut traverser un milieu mauvais conducteur sans produire un dégagement de chaleur. Ce phénomène est accompagné d'une odeur qui a de l'analogie avec celle du phosphore et du soufre. Cette odeur est-elle le résultat de l'impression produite sur les organes de l'odorat par le principe électrique lui-même, ou bien provient-elle d'un principe odorant mis en liberté par le passage de l'électricité, comme le pense M. Schœbœin? c'est ce que nous ne savons pas encore bien. Suivant ce physicien, l'odeur du principe est pungitive lorsqu'il se trouve concentré, et elle a celle du phosphore quand la substance est mêlée avec beaucoup d'air. Il la classe à côté du chlore et du brôme. Il est nécessaire que de nouvelles expériences viennent confirmer ces résultats.

Depuis Franklin on s'est beaucoup occupé des effets de chaleur produits par les décharges électriques ; ces effets sont souvent considérables, et méritent de fixer l'attention des physiciens. On sait que lorsque l'on fait passer la décharge d'une batterie électrique dans un fil fin de métal, le fil s'échauffe dans une certaine longueur, souvent jusqu'à l'incandescence, la fusion ou la volatilisation. Lorsque la charge de la batterie n'est pas suffisante pour fondre les fils, il en résulte sur leurs surfaces des effets de couleur dus à des altérations dépendantes de leur nature et de leur température : avec l'acier, la couleur devient successivement bleue, jaune, rouge vif, puis le métal entre en fusion quand la charge devient plus forte; celle-ci augmentant encore, le métal disparait avec une flamme brillante, et il se dépose sur une feuille de papier placée au-dessus une poussière fine rouge de peroxyde.

Le platine, l'or et l'argent sont également fondus et volatilisés en

employant une charge convenable; les deux premiers ne sont pas oxydés, et peut-être le troisième, car la chaleur qu'ils éprouvent par l'acte même de la fusion est suffisante pour réduire leurs oxydes. On sait, en outre, que la couleur violette de la poussière fournie par l'or volatilisé dans cette circonstance, est celle que prend ce métal quand il se trouve dans un grand état de division. Un grand nombre d'expériences ont été faites pour opérer la fusion des fils métalliques dans l'air et dans différents gaz, au moyen des décharges électriques. L'appareil employé à cet usage est formé d'un tube de verre de 55 à 80 millimètres de diamètre et de 215 millimètres de largeur. Il est fermé à ses deux extrémités par deux douilles à l'une desquelles est un robinet qui sert à faire entrer une quantité d'air donnée ou de tout autre gaz; au-dessus de ce robinet et dans l'intérieur du tube, se trouve une bobine sur laquelle sont enroulés un fil de métal et une ficelle qui sont parallèles et attachés l'un à l'autre de décimètre en décimètre. Un cylindre de cuivre de trois pouces de long est vissé au centre de la douille supérieure; au moyen d'une longue aiguille, on fait passer le bout de la ficelle et le fil de métal à travers le cylindre; puis on le ferme avec un bouchon, de manière que le fil et la ficelle se meuvent dans le tube. Quand le fil est brûlé on lui en substitue un autre au moyen de la ficelle.

Pour constater la quantité d'air absorbé, on adapte à l'orifice inférieur du robinet un tube de verre étroit, ayant à peu près $0^{m},27$ de haut, et ouvert à ses deux extrémités; l'une d'elles est plongée dans un vase qui contient du mercure; quand le robinet est ouvert, l'élévation du métal indique la quantité de gaz absorbé. Comme la température augmente beaucoup dans l'intérieur de l'appareil, on ne doit déterminer l'absorption que lorsque la température est devenue égale à celle de l'air ambiant.

En opérant dans l'air, les métaux oxydables absorbent de l'oxygène. Les métaux qui conduisent le moins l'électricité, tels que le fer, le platine, produisent les plus grands effets de chaleur; tandis que l'or et l'argent, qui sont bons conducteurs, donnent des effets moins marqués.

Voici le tableau des différents résultats obtenus dans l'air par Cuthberson sur des fils de différents métaux, de $0^{m},27$ de longueur, en employant une batterie dont les armures intérieures avaient à peu près $1^{m},79$ c. carrés :

DÉSIGNATION des métaux.	DIAMÈTRE des fils.	CHARGE en grains de l'électromètre.	COULEUR de la poussière métallique recueillie.
Fil de plomb	$\frac{1}{90}$	20	Gris peu foncé.
— d'étain	$\frac{1}{90}$	30	Presque blanc.
— de zinc	$\frac{1}{90}$	45	Id.
— de fer	$\frac{1}{150}$	35	Brun rougeâtre.
— de cuivre	$\frac{1}{150}$	35	Brun tirant sur le pourpre.
— de platine	$\frac{1}{150}$	35	Noir.
— d'argent	$\frac{1}{150}$	48	Id.
— d'or	$\frac{1}{150}$	40	Pourpre brunâtre.

Avec la grande machine du musée de Teyler, à Harlem, Van Marum est parvenu à fondre un fil de fer de 16 mètres de longueur. Cette machine est à deux plateaux. Chacun d'eux a un diamètre de 1m,75. L'électricité fournie par cette machine a une tension telle, que ni des cordons de soie de 14m de longueur, ni des supports de verre de 1m,53 de hauteur, quoique très-secs, ne peuvent suffisamment isoler une aussi grande quantité d'électricité que celle dont le conducteur est chargé. L'attraction est si grande, qu'un fil de 2m de long est attiré à 1m,29 de distance de l'extrémité du conducteur.

Cuthberson et d'autres physiciens ont mesuré avec des électromètres assez grossiers l'action calorifique produite par la décharge d'une batterie, en prenant pour mesure la longueur d'un fil fondu d'un diamètre donné; ils ont trouvé que cette action était à peu près comme le carré de la charge des batteries pour certaines longueurs du fil. Cette loi, cependant, varie suivant l'épaisseur des jarres qui composent la batterie, les plus épaisses produisant, comme on le conçoit très-bien, des effets calorifiques moindres. Cavendish a observé que la quantité d'électricité nécessaire pour charger au même degré différentes jarres ayant même surface armée, était la même, et en raison inverse de leur épaisseur.

Van Marum ayant pris des fils de différents métaux et de même diamètre, a cherché quelle longueur du même fil il pouvait fondre avec une charge égale, et trouvé que le fil de plomb était fondu sur une longueur de 120 pouces, le fil d'étain 120 pouces, le fer 5 pouces, l'or 3 pouces et demi; les fils d'argent, de cuivre rouge, ne fu-

rent pas fondus à un quart de pouce. En essayant de fondre des fils de plomb d'une plus grande longueur, de 13 pieds (angl.), par exemple, il a reconnu que quelques-uns avaient été fondus en plusieurs morceaux ; le fil de plomb fut réduit en plus de trente parties, et un fil d'étain, soumis à la même expérience, en plus de cent. Les expériences de fusion ayant été faites dans l'azote, le plomb donna une poussière fine ; l'étain et le fer furent réduits en petits globules.

En opérant dans l'eau avec des fils de fer d'une certaine longueur, de $\frac{1}{151}$ de pouce (anglais) de diamètre, le fil fut simplement fondu ; l'expérience ayant été répétée avec un fil moins long, le fer fut dissipé en fumée ; et il se dégagea plusieurs bulles d'air annonçant que l'eau avait été décomposée ; le plomb produisit des effets analogues.

Lorsque la charge d'une batterie électrique n'est pas suffisante pour fondre un fil métallique d'un petit diamètre, il se produit des effets intéressants à connaître et que nous allons indiquer.

Nairne, ayant fait passer une très-forte décharge à travers des fils très-fins de fer et d'argent qui étaient trop longs pour être fondus, trouva que leur longueur était diminuée sans que leur poids le fût ; ce qui semblait indiquer une diminution dans le sens de la longueur et une augmentation de diamètre.

M. Edmond Becquerel, ayant répété cette expérience, observa que cet effet, après plusieurs épreuves, changeait la forme du fil. Au lieu d'étendre celui-ci entre les deux pinces d'un excitateur universel, il le suspendit verticalement, l'une des extrémités étant fixée entre les branches d'une pince, et l'autre servant à soutenir un poids pour tendre légèrement le fil : ce poids reposait sur un support en cuivre, à pieds mobiles, qu'on pouvait élever ou abaisser à volonté. Ce jeune physicien a reconnu qu'en opérant avec des fils de platine, les diminutions étaient sensiblement proportionnelles au rapport inverse du cube des diamètres des fils.

M. Harris, en cherchant les effets des décharges dans le vide ou dans l'air raréfié, a trouvé que des fils très-fins de métal se fondent plus difficilement dans le vide que dans l'air à la pression ordinaire ; il a fait passer la décharge d'une batterie de vingt-cinq pieds anglais carrés à travers un fil de fer renfermé dans un tube bien épuisé d'air, sans que le fil fût affecté sensiblement. L'électricité surabondante paraissait trouver un passage plus facile à travers l'air raréfié à la surface, d'où résultait un effet très-brillant. En laissant rentrer l'air, le fil fut aussitôt fondu, bien que l'on n'employât que le cinquième de la surface armée.

M. Edmond Becquerel disposa sous une cloche un fil de platine de $0^{mm},072$ de diamètre, dont la partie supérieure communiquait à une tige isolée traversant une boite à cuir. En faisant passer dans le vide fait à une pression de cinq millimètres la décharge d'une batterie de dix-huit bocaux, à travers des fils de $0^{mm},183$ de largeur et de $0^{m},34$ de longueur, il trouva que la diminution moyenne était de 0,013 de la longueur du fil; or, pour un fil de platine de même diamètre, il avait trouvé $0^{m},011$ pour cette diminution dans l'air à la pression ordinaire; on peut donc conclure de là que celle-ci ne paraît pas influer sur la production du phénomène.

En soumettant un fil de platine de $0^{mm},072$ de diamètre à des décharges électriques successives, capables de le faire rougir sans fondre, il a remarqué qu'à la troisième ou quatrième décharge il n'est plus droit comme auparavant et qu'il devient ondulé. A mesure que les décharges se succèdent, les parties ondulées augmentent de grandeur, sans jamais disparaître pour faire place à d'autres; en diminuant ensuite un peu la longueur du fil et faisant passer une nouvelle décharge, il ne se forme plus de nouvelles ondulations, mais elles augmentent encore, quelle que soit la force de la décharge; si l'on tient le fil tendu, la traction empêche l'effet d'être produit. Il semblerait résulter de cette expérience que le fil, par l'effet du passage de l'électricité, éprouve un mouvement ondulatoire dans le sens transversal, dont la vitesse est si grande que le fil conserve les ondulations produites par le passage de l'électricité dans les premiers instants.

Passons aux effets calorifiques produits dans des fils métalliques par le passage du courant voltaïque. Nous commencerons par les recherches que M. Peltier a faites à ce sujet avec des courants d'une faible intensité, en se servant de l'appareil fig. 19, pl. VI, dont voici la description :

A et B, deux couples thermo-électriques, composés chacun d'un petit barreau de bismuth et d'un autre d'antimoine.

C, fil de cuivre qui unit l'antimoine a' du couple supérieur au bismuth b' du couple inférieur.

D, E, fils de cuivre servant à établir la communication avec le galvanomètre G, de quatre-vingt-quatre tours, et complétant le circuit entre le bismuth supérieur b'' et l'antimoine inférieur a''.

F, H, extrémités libres, ou mâchoires formant pince, qu'un ressort applique l'une sur l'autre, et entre lesquelles on place une membrane très-mince pour empêcher le contact métallique. La communication

est tellement établie que les deux soudures en présence étant échauffées également, les deux courants thermo-électriques produits s'ajoutent.

J K, barreau que doit traverser le courant voltaïque.

L, M, conducteurs de la pile.

A′, A″, boules d'un thermoscope traversées chacune par un couple bismuth et antimoine dont la soudure est au milieu. Les deux couples peuvent être mis en communication, soit entre eux, soit avec les deux autres couples précédemment mentionnés au moyen des conducteurs m' m'' m''' m'''', disposés de manière à pouvoir diriger le courant, tantôt dans un sens, tantôt dans un autre.

Au moyen de cette disposition, on conçoit que si l'on place des fils traversés par des courants entre les mâchoires de la pince thermo-électrique, les moindres variations dans la température de ces fils seront immédiatement accusées par les déviations de l'aiguille aimantée; de plus, si les soudures qui se trouvent dans les boules A′ et A″ sont échauffées inégalement, ou l'une échauffée et l'autre refroidie, la marche de l'index du thermoscope fera connaître les effets de chaleur produits. Il a été reconnu d'abord que, pour des fils de différents métaux, en variant l'intensité du courant, il y a une élévation de température, même lorsque les conducteurs sont homogènes; que la chaleur est la même dans toute la longueur des fils, à l'exception des extrémités, où elle augmente ou diminue, selon que les fils de jonction sont moins bons ou meilleurs conducteurs que le métal du fil : en employant des pinces de cuivre pour retenir les extrémités du fil, la température baisse, et cet effet se ressent à deux ou trois centimètres de distance, selon l'intensité du courant.

M. Peltier, cherchant la loi que suit le changement de température selon l'intensité du courant ou la section des conducteurs, a obtenu les résultats suivants :

FORCE du courant.	TEMPÉRATURE d'un fil de cuivre de 0mm,1 de diamètre.	REMARQUES.
2	0°,7	Tous ces degrés sont relatifs aux variations de l'aiguille aimantée, et peuvent être regardés comme proportionnels, en raison de la construction de l'appareil.
4	2	
6	4	
8	6	
10	9	
12	12	
16	18	
20	27	
24	36	

Résultats obtenus en faisant varier la section des fils.

DIAMÈTRE des fils.	TEMPÉRATURE pour un courant de 15°.	TEMPÉRATURE pour un courant de 30°.
0mm,8	2°,4	7
8,6	4 ,7	14
4	7	21
3	14	42

Les résultats précédents montrent que le rapport de l'intensité du courant à la température est tel que, pour un courant double ou un diamètre moitié moindre, la température est triple. Cette loi a lieu dans un conducteur homogène ; mais quand on fait passer le courant dans des circuits formés de plusieurs métaux, on reconnaît que la température varie selon le sens du courant pour la plupart d'entre eux, la plus grande élévation de température ayant lieu lorsque l'électricité négative passe d'un meilleur conducteur dans un moins bon, du cuivre au fer, par exemple, au zinc, au plomb, etc. : le contraire a lieu avec le courant positif et dans ce dernier cas, le fait est remarquable.

Les métaux qui cristallisent facilement, tels que le bismuth, l'an-

timoine, et probablement l'arsenic, produisent un abaissement de température notable à l'une des soudures. Ce fait est une anomalie, car il y a toujours élévation de température quand le courant passe d'un conducteur dans un autre; mais hâtons-nous de dire que cet effet ne se manifeste pas au delà d'une certaine intensité de courant. Voici de quelle manière M. Peltier a mis ce fait en évidence :

Ayant soudé une lame de bismuth entre deux lames de cuivre, et fermé le circuit, il y fit passer un courant dont il augmentait successivement l'intensité, et obtint, à la soudure par laquelle entrait le courant négatif, les résultats suivants :

Le courant étant de :

15° a donné la température de	— 2°,5
20°	— 4°,5
28°	— 4°,5
30°	0°
35°	+ 4°

Par conséquent, il y a eu abaissement de température à la soudure, tant que l'intensité du courant n'était pas égale à 30°.

M. Peltier a, de plus, obtenu à la soudure par laquelle entrait le courant positif une température de 10° à 50° galvanométriques. On conçoit qu'entre l'élévation de la température à un bout et un abaissement à l'autre, il y a un 0 qui avance ou rétrograde, selon que l'on s'approche ou s'éloigne du maximum d'effets. En augmentant l'intensité du courant, le 0 rétrograde jusqu'à la soudure négative; puis il y a élévation de température, laquelle est toujours inférieure à celle de l'autre soudure. Le même physicien a cherché également ce qui se passe avec des barreaux de bismuth et d'antimoine; mais auparavant il a essayé chacun de ces barreaux, comme précédemment, en le plaçant entre deux lames de cuivre.

Lame de bismuth soudée entre deux lames de cuivre.

	Température.
Soudure par laquelle entre le courant positif.........	+ 20°
A l'autre soudure.	— 10°

Lame d'antimoine placée entre deux lames de cuivre.

A la soudure positive...........................	— 5°
A la soudure négative...........................	+ 10°

Les deux lames de bismuth et d'antimoine ayant été soudées ensemble, on a obtenu à la même soudure, avec le même courant positif, cheminant du bismuth à l'antimoine........... — 37°

Avec le courant négatif.......................... + 45°

Ce refroidissement, produit par le passage d'un courant de faible intensité, du bismuth à l'antimoine, est reconnu au moyen du thermoscope T, fig. 19, pl. VI, en disposant les fils de communication de manière que le courant positif passe du bismuth à l'antimoine dans une des soudures A', A'', et de l'antimoine au bismuth dans l'autre; dans ce cas l'index marche du côté refroidi.

Nous ferons remarquer, à l'égard de l'abaissement de température, qui a lieu lorsque l'antimoine est positif, c'est-à-dire lorsqu'il se trouve dans le même état électrique que celui qu'il prend quand on le frotte contre le bismuth, ou bien lorsqu'on élève la température des points de jonction, bismuth et antimoine, de deux barreaux soudés par un de leurs bouts, nous ferons remarquer, disons-nous, qu'en faisant passer un courant positif de faible intensité du bismuth à l'antimoine, on fait naître les états électriques naturels des deux métaux, et dans ce cas, il devrait y avoir élévation de température, ce qui n'est pas; il y a donc là un phénomène que nous ne connaissons pas. Nous ne devons pas oublier de mentionner plusieurs observations qui ne sont pas sans importance. Il y a toujours élévation de température aux points de jonction de deux métaux, quelque faible que soit l'intensité du courant, quand l'électricité trouve sur son passage un obstacle ou une solution de continuité qu'elle ne peut franchir sans perdre une portion de son intensité. Ainsi, au contact de deux fils de cuivre, de deux lames de bismuth, il y a toujours production de chaleur tant que les fils ne sont pas soudés; on trouve constamment une légère différence en faveur du courant négatif. Ce fait rentre dans le principe connu, savoir, que l'électricité positive a plus d'aptitude pour vaincre l'inertie des mauvais conducteurs que l'autre électricité; dès lors, elle doit, en général, produire une élévation de température moindre que l'électricité négative.

M. de la Rive s'est occupé de rechercher les effets calorifiques produits par le passage de courants peu intenses dans des circuits métalliques, en se servant du thermomètre de Bréguet, auquel il a fait de légères modifications; l'hélice faisait partie d'un circuit parcouru par un courant. Il s'est attaché particulièrement à chercher quelle pouvait être, sur cet appareil, l'influence d'un ou plusieurs diaphragmes placés dans un liquide au travers duquel passait le courant qui parcourait le fil du multiplicateur. Voici les résultats obtenus, en faisant traverser au courant successivement le multiplicateur magnétique, le multiplicateur calorifique et de l'acide nitrique dans lequel se trouvaient des lames de platine. Le courant provenait d'une pile de huit couples ayant chacun $0^{m},2110$ c. carrés de surface.

Lames.	Galvanomètres magnétique.	Galvanomètres calorifique.
1	85	312
2	84	170
3	83	115
4	75	12
5	40	0
6	37	0

Ces résultats montrent combien la vitesse du courant est une condition nécessaire au dégagement de la chaleur, quand ce courant rencontre de la résistance. L'influence de cette vitesse est telle, suivant M. de la Rive, qu'il paraît que la quantité d'électricité ne peut la compenser, puisque, avec une pile composée d'éléments de $0^m,45$ c. carrés de surface, les effets calorifiques diminuent quand on emploie plus de dix ou douze couples.

Quels sont les phénomènes de chaleur produits dans les liquides par le passage d'un courant? Voici les expériences qui ont été faites à ce sujet: M. OErsted, ayant plongé des thermomètres dans de l'eau où se trouvaient deux lames de platine communiquant à une pile voltaïque, trouva que le thermomètre placé près du conducteur positif indiquait 20°,5, tandis que celui qui se trouvait près du conducteur négatif marquait 18°, et un troisième placé au milieu, 23°.

Ne peut-on pas attribuer la différence qui existe entre la chaleur dégagée au pôle positif et au pôle négatif à ce que les gaz, en se dégageant, ne reprennent pas la même quantité de chaleur? Du côté négatif, il y a deux volumes d'hydrogène pour un volume d'oxygène au pôle positif; or, nous savons que la chaleur spécifique de l'hydrogène est égale à 0,296, et celle de l'oxygène à 0,2361 : il en résulte que les deux volumes du premier gaz doivent absorber plus de chaleur que le volume du second. Il n'est donc pas étonnant que la partie du liquide contiguë au conducteur négatif accuse une température moins élevée que la partie du liquide en contact avec le conducteur positif.

Passons aux effets produits par des courants plus énergiques.

Davy a observé que la décharge d'une batterie à larges plaques, en pleine activité, qui traverse un fil de fer de $0^m,650$ de longueur sur $0^{mm},3$ de diamètre, plongeant dans l'eau, acquiert une température suffisante pour la faire entrer en ébullition. On peut également employer ce moyen, comme nous le verrons ci-après, pour mesurer la quantité de chaleur produite dans un temps donné, par le passage de l'électricité dans un conducteur métallique.

En fixant des morceaux de charbon bien recuit aux deux extrémités des deux conducteurs de la pile, on en vit jaillir dans l'eau de vives étincelles ; les deux bouts du charbon parurent d'un rouge blanc pendant quelque temps ; il y avait un dégagement abondant de gaz, lequel était accompagné d'un bruit semblable à celui d'un liquide en ébullition. Les effets furent semblables en substituant à l'eau des huiles volatiles, de l'éther, de l'alcool.

L'ignition du charbon provenait probablement de ce que, pendant son contact avec le liquide, il était entouré de globules de gaz qui empêchaient la chaleur dégagée de se répandre dans le liquide environnant.

Davy a recherché si la chaleur dégagée dans les recompositions chimiques n'était pas due aussi au jeu des forces électriques. A cet effet, ayant placé dans le circuit d'une petite batterie de 100 paires de disques, deux cônes d'or remplis d'eau distillée, communiquant par une mèche d'asbeste, il plongea un thermomètre successivement dans chacun des liquides, puis ajouta à l'eau du cône positif une goutte de solution de sulfate de potasse : la décomposition commença aussitôt et fut suivie d'une élévation de température qui devint suffisante pour faire entrer l'eau en ébullition en moins de deux minutes. Avec une solution de nitrate d'ammoniaque, la chaleur dégagée s'éleva tellement qu'elle évapora entièrement l'eau en trois ou quatre minutes, avec un bruit semblable à une explosion ; une certaine quantité de lessive de potasse introduite dans les cônes avec de l'acide sulfurique concentré ne produisit que de faibles effets calorifiques. Ces faits mettent en évidence l'influence de la décomposition électro-chimique du liquide sur les effets calorifiques. La chaleur serait donc produite ici, en partie, par la neutralisation des deux électricités devenues libres par l'effet de la décomposition.

L'expérience suivante tend encore à prouver que la chaleur est formée de la réunion des deux électricités. Davy, voulant voir jusqu'à quel point pouvaient aller les effets de chaleur produits par une forte pile, opéra avec celle de l'Institution royale de Londres, formée de deux mille couples. Son appareil se composait d'un ballon muni de deux boîtes à cuir, dans lesquelles passaient deux fortes tiges pouvant s'approcher ou s'éloigner à volonté ; à chaque extrémité des tiges était fixé un petit cône de charbon bien recuit et éteint dans le mercure, pour qu'il fût meilleur conducteur. Les sommets des deux cônes ayant été placés à une faible distance l'un de l'autre, on mit les deux tiges en communication avec les pôles de la pile. La décharge électrique franchit l'intervalle qui séparait les deux sommets ; il en résulta un jet de lu-

mière dont l'éclat était supérieur à toutes les lumières qu'on pourrait produire, et la chaleur fut si intense que le charbon et la plombagine furent volatilisés. Les deux pointes de charbon étaient placées de manière à ce que l'on pût les tenir éloignées jusqu'à une distance de $0^m,108$, sans que le jet de lumière fût interrompu. En faisant l'expérience dans le vide, les effets calorifiques et lumineux durèrent pendant plusieurs heures de suite, sans que le poids du charbon fût sensiblement diminué. Les substances les plus réfractaires, telles que le quartz, la magnésie, la chaux, le saphir, soumises à cette chaleur énorme, entrèrent facilement en fusion.

Le docteur Hare, avec un appareil de quatre-vingts couples en hélice, auquel il a donné le nom de *déflagrateur*, a obtenu des effets de chaleur non moins étonnants. Ayant placé de la plombagine au pôle négatif et du charbon bien préparé au pôle positif, il mit en contact ces deux substances : l'étincelle fut très-vive, et l'on distinguait facilement les globules de plombagine en fusion au milieu de l'ignition. Aucun globule n'apparaissait dans l'endroit de la plombagine où se trouvait le foyer de chaleur ; il y avait seulement une excavation hémisphérique, et la plombagine avait l'apparence d'une scorie. Au pôle positif le charbon s'allongeait vers la plombagine, et la matière noire qui s'y accumulait présentait tout à fait l'état de fusion : tout semblait faire croire qu'elle était transformée en vapeur : l'extrémité du charbon était recouverte de nombreux globules de matière vitreuse ; les plus éloignés du foyer avaient une couleur noire, d'autres étaient colorés en brun, en jaune, et d'autres étaient limpides comme le flintglass, et ressemblaient à l'hyalite. Ces globules, qui pouvaient résister à une forte pression sans être brisés, rayaient le verre à vitre et le flintglass.

Avec une pile de grandeur moyenne, telle qu'une pile à la Wollaston, de dix couples, on peut obtenir des effets considérables de chaleur ou de lumière, en expérimentant avec un morceau de charbon bien cuit et éteint dans le mercure, en communication avec une des extrémités de la pile et un fil de platine en relation avec l'autre extrémité ; à l'instant où l'on touche le charbon avec le fil, en exerçant une pression, il s'opère un dégagement de lumière que l'œil a peine à supporter. La chaleur est si intense, que le bout d'un fil de platine d'un demi-millimètre de diamètre fond comme du plomb.

On peut utiliser la chaleur dégagée par le passage de courants énergiques dans des fils métalliques, mais non d'une intensité aussi grande que celle des courants produits par Davy et le docteur Harre, pour opérer diverses réactions chimiques : nous avons fait usage, à cet

effet, d'une pile à courant constant dont nous donnerons ultérieurement la description, et qui est composée de douze couples, formés chacun de deux éléments cuivre, zinc, ayant 42 centimètres de hauteur sur 31 de largeur. Voici le mode d'expérimentation employé :

Un fil de platine d'un demi-mill. à un mill. de diamètre, dans lequel on fait passer un courant énergique, devient incandescent dans une certaine portion de sa longueur. Mais si, au lieu d'un fil droit, on se sert d'un fil enroulé en spirale dans sa partie moyenne, et dont les spires vont en diminuant, de manière à former un cône dont les circonvolutions ne se touchent pas, ou bien qu'on l'enroule en hélice, la chaleur se concentre dans un espace très-restreint, et si elle est poussée jusqu'au rouge blanc on a, dans l'espace circonscrit, une température excessivement élevée, capable de fondre souvent les substances les plus réfractaires. La spirale est destinée à recevoir de petits creusets; l'hélice, des capsules ou de petites coupelles. Les creusets, suivant les effets que l'on veut produire, sont en métal, en porcelaine, en argile réfractaire, et, en général, à minces parois; on peut se servir également de creusets en charbon, et il en résulte alors une chaleur excessive par l'action combinée de la combustion du charbon et du passage de l'électricité dans le fil. La cendre provenant de cette combustion se fond avec le flux, et forme une enveloppe vitreuse mince, qui entoure les spires du fil. Quand cette enveloppe n'est pas suffisamment épaisse, le bouton métallique se combine avec le platine. Pour augmenter la température, on place sous la spirale ou l'hélice une lampe à alcool dont la flamme enveloppe le creuset. La chaleur devient alors si intense qu'elle fond quelquefois des fils de platine d'un assez gros diamètre; mais on dispose tellement l'appareil, que l'on puisse à volonté éloigner ou approcher la flamme, et régler ainsi la température. Avec un peu d'habitude, on est averti par la radiation lumineuse si l'on est près ou non du point de fusion du fil.

Pour coupeller on se sert de coupelles plates en cendres d'os, et on insuffle de l'air sur le bain métallique. On a fondu ainsi et coupellé quelques décigrammes d'un minerai d'or, dont la teneur était de 0,00002 ; le bouton de retour était visible.

Ce mode d'expérimentation a l'avantage de pouvoir opérer des phénomènes de fusion dans plusieurs milieux, car il suffit de placer la spirale ou l'hélice dans une cloche renfermant le gaz que l'on veut faire réagir sur les substances soumises à l'action de la chaleur.

M. Wartmann (*Annal. de l'électricité*, n° 1, page 74) a voulu traiter la question relative à l'échauffement des conducteurs métalliques, traversés par un courant, en s'attachant à déterminer la dia-

thermansie électrique d'un corps, c'est-à-dire, la faculté d'émettre plus ou moins de chaleur par le passage d'un courant, sans avoir égard au pouvoir conducteur des circuits et aux effets complexes de chaleur produits quand le courant traverse, outre l'hélice du thermomètre, des couples de différents métaux, dans lesquels ces derniers sont appliqués plus ou moins bien l'un sur l'autre, au lieu d'être soudés. Quoique ces recherches ne soient pas dans la direction que l'on doit suivre pour arriver aux lois qui président au dégagement de la chaleur dans les fils conducteurs traversés par un courant électrique, en raison de la résistance plus ou moins grande qu'il y éprouve, suivant son intensité; néanmoins, nous rapporterons les résultats obtenus par ce physicien, attendu qu'ils peuvent être pris quelquefois en considération dans la question qui nous occupe. Il a employé le thermomètre de Bréguet, muni de l'appendice nécessaire pour que l'hélice de ce thermomètre fût traversée par le courant. La sensibilité de son appareil était telle, que pour une différence de température égale à 1° centigrade, l'aiguille parcourait quatorze divisions du cadran. L'appareil voltaïque destiné à fournir le courant était un grand élément à la Wollaston, dont le zinc était amalgamé et le liquide acidulé. Les conducteurs polaires étaient deux très-gros barreaux de cuivre, recourbés à leur extrémité libre, de manière à pouvoir plonger chacun dans un verre rempli de mercure pur; quatre verres semblables, remplis également de mercure, étaient placés à côté des deux premiers, sur la même ligne; quatre lames de cuivre rouge plongeaient jusqu'au fond par un bout, tandis que l'autre bout de chaque lame, recourbé quatre fois, se terminait par une surface horizontale destinée à supporter l'un des bouts des deux barreaux mis en expérience; les deux verres les plus rapprochés du thermomètre étaient en relation avec lui au moyen de barreaux de cuivre semblables aux précédents. Les deux verres avec l'appareil voltaïque communiquaient avec les deux verres placés au milieu, au moyen de semblables barreaux; enfin les parties plongées dans le mercure avaient été décapées et amalgamées.

Pour détruire l'effet des variations d'intensité de la pile et celui d'inertie de l'hélice, on intervertissait le sens du courant. Les observations furent faites par série de cinq expériences dans chaque sens.

M. Wartmann a fait passer le courant successivement dans deux des métaux dont les noms suivent : l'acier, l'antimoine, l'argent, le bismuth, le cadmium, le cuivre, l'étain, le fer, le laiton, le mercure, le platine, le plomb et le zinc. Les métaux étaient en cylindres, en fils ou en feuilles.

Nous rapportons dans le tableau suivant quelques-uns des résultats obtenus par M. Wartmann. Les lettres E S indiquent les quantités relatives à l'entrée ou à la sortie du courant par le métal dont le nom est dans la colonne de gauche.

NOMS des couples.		Déviations moyennes. E.	S.	Différences.	NOMS des couples.		Déviations moyennes. E.	S.	Différences.
Acier.	Antimoine.	95°,57	100°,05	— 4°,48	Cadm.	Cuivre	306°,00	308,°11	— 2, 11
—	Argent.	175, 85	174, 14	+ 1, 71	—	Etain.	206, 66	209, 11	— 2, 45
—	Bismuth.	61, 53	60, 80	+ 0, 73	—	Fer.	171, 50	169, 22	+ 2, 28
—	Cadmium.	133, 55	133, 30	+ 0, 25	—	Laitoo	316, 62	318, 75	— 2, 13
—	Cuivre.	251, 65	253, 05	— 1, 40	—	Merc.	115, 20	114, 60	+ 0, 60
—	Étain.	148, 40	149, 60	— 1, 20	—	Or.	122, 46	122, 80	— 0, 34
—	Fer.	140, 60	141, 20	— 0, 60	—	Plat.	115, 90	115, 90	0, 00
—	Laiton.	105, 70	99, 15	+ 6, 65	—	Plomb	211, 60	213, 45	— 1, 85
—	Mercure.	168, 47	168, 42	+ 0, 05	—	Zinc.	100, 80	100, 80	0, 00
—	Or.	234, 06	234, 93	— 0, 87	Cuivre	Étain.	227, 55	226, 22	+ 1, 33
—	Platine.	163, 00	161, 14	+ 1, 86	—	Fer.	304, 60	304, 00	+ 0, 60
—	Plomb.	152, 57	151, 77	+ 0, 80	—	Laiton	115, 28	152, 42	— 1, 14
—	Zinc.	148, 29	135, 61	+12, 68	—	Merc.	320, 66	318, 50	+ 2, 10
Antimoine.	Argent.	149, 42	149, 42	0, 00	—	Or.	292, 46	292, 73	— 0, 27
—	Bismuth.	184, 60	133, 88	+50, 72	—	Plat.	307, 77	308, 65	— 0, 88
—	Cadmium.	185, 81	187, 68	— 1, 87	—	Plomb	333, 71	334, 85	— 1, 14
—	Cuivre.	282, 84	278, 73	+ 4, 11	—	Zinc.	264, 50	264, 75	— 0, 25
—	Étain.	159, 54	165, 72	— 6, 18	Étain.	Fer.	312, 37	313, 12	— 0, 75
—	Fer.	170, 00	172, 15	— 2, 15	—	Laiton	326, 50	326, 10	+ 0, 40
—	Laiton.	294, 00	280, 90	+13, 10	—	Merc.	327, 66	327, 66	0, 00
—	Mercure.	153, 27	155, 18	— 1, 91	—	Or.	433, 00	433, 00	0, 00
—	Or.	344, 57	345, 28	— 0, 71	—	Plat.	340, 43	340, 43	0, 00
—	Platine.	226, 51	228, 00	— 1, 49	—	Plomb	310, 25	309, 83	+ 0, 42
—	Plomb.	236, 57	236, 35	+ 0, 22	—	Zinc.	193, 25	192, 62	+ 0, 63
—	Zinc.	108, 00	106, 93	+ 1, 07	Fer.	Laiton	249, 90	249, 20	+ 0, 70
Argent.	Bismuth.	146, 70	138, 20	— 8, 50	—	Merc.	191, 00	188, 54	+ 2, 46
—	Cadmium.	237, 73	238, 20	+ 0, 47	—	Or.	106, 50	104, 00	+ 2, 50
—	Cuivre.	406, 90	404, 20	— 2, 70	—	Plat.	306, 10	304, 72	+ 1, 38
—	Etain.	326, 00	327, 40	— 1, 40	—	Plomb	283, 53	281, 13	+ 2, 40
—	Fer.	306, 96	309, 08	— 2, 12	—	Zinc.	231, 92	234, 03	— 2, 11
—	Laiton.	424, 50	424, 50	+ 0, 00	Laiton	Merc.	273, 22	272, 11	+ 1, 11
—	Mercure.	249, 00	248, 85	+ 0, 15	—	Or.	358, 50	360, 12	— 1, 52
—	Or.	257, 60	255, 80	— 1, 80	—	Plat.	306, 10	304, 72	+ 1, 38
—	Platine.	199, 00	199, 50	— 0, 50	—	Plomb	296, 80	296, 80	0, 00
—	Plomb.	381, 00	362, 44	— 1, 44	—	Zinc.	277, 02	278, 67	— 1, 65
—	Zinc.	311, 60	312, 00	+ 0, 40	Merc.	Or.	282, 25	281, 25	+ 1, 00
Bismuth.	Cadmium.	155, 34	151, 09	+ 4, 25	—	Plat.	269, 00	269, 80	— 0, 80
—	Cuivre.	146, 10	146, 10	+ 0, 00	—	Plomb	317, 57	317, 42	+ 0, 15
—	Étain.	253, 06	253, 00	+ 0, 06	—	Zinc.	268, 60	266, 30	+ 2, 30
—	Fer.	158, 26	157, 53	+ 0, 73	Or.	Plat.	183, 14	182, 71	+ 0, 43
—	Laiton.	151, 80	147, 00	+ 4, 80	—	Plomb	407, 50	407, 50	0, 00
—	Mercure.	248, 35	246, 85	+ 1, 50	—	Zinc.	175, 00	174, 00	+ 1, 00
—	Or.	322, 68	324, 36	— 1, 68	Plat.	Plomb	301, 66	300, 55	+ 1, 11
—	Platine.	127, 43	135, 73	— 8, 30	—	Zinc.	281, 45	284, 90	— 3, 45
—	Plomb.	204, 86	213, 66	— 8, 80	Plomb	Zinc.	321, 25	322, 20	— 0, 90
—	Zinc.	110, 16	99, 83	+10, 33					

En faisant la part des erreurs inévitables dans des expériences telles

que celles qui ont conduit à ces résultats, M. Wartmann pense que l'on doit regarder comme sensiblement égaux les résultats dont la différence n'excède pas deux degrés. Ce tableau montre que l'on peut ranger et établir l'ordre suivant de diathermansie électrique, dans lequel chacun des métaux conduit moins bien que ceux qui le précèdent, mais mieux que ceux qui le suivent lorsqu'il forme un couple avec eux :

Étain.
Antimoine.
Acier.
Zinc.
Platine.
Fer.
Argent.
Or.
Plomb.
Bismuth.
Cuivre.
Cadmium.
Laiton.
Mercure.

Cet ordre diffère beaucoup de celui des métaux rangés selon leur faculté conductrice pour la chaleur et l'électricité. M. Wartmann s'est demandé si l'on ne devait pas établir une différence entre les conductibilités pour la chaleur déjà formée et pour la chaleur produite par la résistance qu'éprouve l'électricité en traversant les conducteurs.

Nous ferons remarquer que plusieurs couples n'ont pas présenté de différence sensible dans leur diathermansie relative, suivant la direction du courant.

Ce sont :

Antimoine-argent.
Argent-laiton.
Bismuth-cuivre.
Cadmium-platine.
Cadmium-zinc.
Étain-mercure.
Étain-or.
Étain-platine.
Laiton-plomb.
Or-plomb.

Il faut remarquer que dans ces dix couples se trouvent les métaux cristallisables, cristaux peu réguliers, tels que l'antimoine, le bismuth et le zinc, c'est-à-dire ceux à texture peu homogène.

Les quatre-vingt-un autres couples peuvent être divisés en trois groupes distincts : les uns, au nombre de cinquante-cinq, ne présentent que des différences de 2° au plus, différences qui peuvent être négligées.

Les seconds présentent des variations intermédiaires entre 2 et 4° ; ce sont :

Antimoine-fer.
Argent-cuivre.
Argent-fer.
Cadmium-cuivre.
Cadmium-étain.
Cadmium-fer.
Cadmium-laiton.
Cuivre-mercure.
Fer-mercure.
Fer-or.
Fer-plomb.
Fer-zinc.
Platine-zinc.

Le dernier groupe est formé des couples dont les différences sont supérieures à 4° ; ce sont :

Acier-antimoine.
Acier-laiton.
Acier-zinc.
Antimoine-bismuth.
Antimoine-cuivre.
Antimoine-étain.
Antimoine-laiton.
Argent-bismuth.
Bismuth-cadmium.
Bismuth-laiton.
Bismuth-platine.
Bismuth-plomb.
Bismuth-zinc.

Il est à remarquer que ces couples sont formés de métaux cassants, réunis entre eux ou associés à des métaux ductiles. On trouve encore que l'acier, l'argent, le cadmium, l'étain, le mercure, le platine

et le plomb, n'opposent pas à la chaleur du courant négatif une résistance sensiblement plus grande que celle qu'ils font subir à la chaleur du courant positif; tandis que l'or, le laiton, le bismuth, l'antimoine, et surtout le cuivre, le zinc et le fer, semblent présenter quelque différence légère.

M. Wartmann a observé, comme nous et M. Peltier, des renversements dans les valeurs des déviations données par un même couple traversé par un même courant. Ces renversements ont été observés dans quarante-quatre couples, lorsqu'un des métaux, ordinairement celui dont la texture était la moins homogène, avait été retourné bout à bout, le sens du courant restant le même après le retournement. Ces couples sont presque exclusivement formés par l'acier, l'antimoine, le bismuth, le cadmium, le fer, le platine, le plomb et le zinc. En général, les couples dans lesquels l'acier, le plomb et le cadmium jouent un rôle, se distinguent par la difficulté avec laquelle le courant les traverse, et par la lenteur de l'échauffement graduel qu'indique l'hélice.

Dans ces expériences, M. Wartmann n'a pas observé de production de froid.

Il a signalé une conséquence que nous devons mentionner : c'est qu'il faut avoir égard à l'ordre de succession des conducteurs hétérogènes à travers lesquels se propage un courant électrique; et qu'il n'est, ordinairement, pas indifférent pour la mesure des quantités de fluide qui sont admises à les traverser, de donner au courant qui passe par un conducteur homogène telle direction plutôt que telle autre.

L'auteur attribue à cette circonstance les divergences notables dans les résultats, et tire les conséquences suivantes de ses expériences :

1° Les couples formés de divers métaux non soudés présentent des différences considérables dans leur diathermansie électrique, suivant le sens des courants qui les traversent. Ces différences sont surtout remarquables dans les couples où il entre un métal à texture cristalline; elles sont nulles, ou à peu près, pour les couples qui ne renferment que des métaux ductiles.

2° La faculté de diathermansie électrique n'est pas proportionnelle à la conductibilité pour la chaleur, ni à la conductibilité pour l'électricité.

3° Les mêmes couples présentent des renversements dans leur diathermansie électrique relative, suivant l'intensité du courant qui les traverse et le retournement des métaux, lorsque le sens du courant et toutes les autres circonstances restent invariables.

4° Ces renversements s'observent aussi dans un conducteur homogène peu ou point ductile, et sont peut-être dus à une polarisation des molécules; ils disparaissent après un certain nombre de retournements du conducteur.

5° La production du froid par le passage d'un courant galvanique est probablement un effet des soudures des métaux d'un couple hétérogène.

Jusqu'ici il n'a été réellement question que de faits généraux relatifs à la production de la chaleur, pendant le passage de l'électricité dans des circuits métalliques, et de quelques lois particulières, et non des lois générales qui régissent ce phénomène; ces dernières vont maintenant nous occuper.

Il est bien prouvé actuellement que la chaleur produite dans un fil conducteur, traversé par un courant, est d'autant plus grande que ce courant éprouve plus de résistance, et que ce fil par conséquent est moins bon conducteur. Or, comme le pouvoir conducteur est en raison inverse de la longueur, et en raison directe de la section du fil, il était assez naturel d'en conclure que la quantité de chaleur dégagée fût en raison inverse du pouvoir conducteur. M. Harris et d'autres physiciens ont vérifié cette loi au moyen de l'électricité ordinaire.

M. J. P. Joule (*Philos. magaz.*, oct. 1841) vient de le faire avec l'électricité voltaïque, mais il a fait entrer dans ses expériences un autre élément, l'intensité du courant. L'appareil dont il a fait usage se compose : 1° d'un multiplicateur, dit boussole des tangentes; 2° du fil métallique dont on veut connaître le pouvoir calorifique, disposé comme il suit : ce fil passe dans un tube de verre très-délié : on ne laisse passer qu'un très-petit bout d'un côté hors du tube, tandis que l'autre est enroulé autour du tube même, de manière à former une spirale serrée, en évitant toutefois que les circonvolutions ne se touchent. Le tube est placé ensuite dans une éprouvette renfermant une quantité d'eau donnée. Dès l'instant que le fil est mis en communication avec l'appareil voltaïque, toute la chaleur produite est employée à élever la température de l'eau. Or, comme le vase est toujours le même, ainsi que la quantité d'eau, et que l'expérience dure le même temps, les températures peuvent servir à comparer les quantités de chaleur dégagées, quand elles ne présentent pas de grandes différences, sans quoi il faudrait tenir compte des effets du refroidissement; 3° enfin, un très-bon thermomètre pour observer les températures. M. Joule a pris pour un degré la quantité d'électricité capable de décomposer, en une heure, un nombre déterminé de grains d'eau.

Dans ses expériences, un degré correspondait à 33°,5 de déviation du multiplicateur, produite par un courant capable de décomposer cent grains d'eau par heure.

Voici les résultats de quelques expériences : deux fils de cuivre d'une longueur d'environ six pieds (mesure anglaise), dont l'un avait $\frac{1}{28}$ de pouce de diamètre, l'autre $\frac{1}{50}$, disposés comme il a été dit précédemment, furent plongés dans deux éprouvettes de verre renfermant chacune neuf onces d'eau. On fit passer pendant une heure, dans chaque fil, un courant d'une intensité égale à 1°, 1 Q (Q indique les degrés rapportés à la quantité d'eau décomposée). La température de l'eau où plongeait le fil le plus fin s'était élevée de 3°,4 F.; celle de l'eau où se trouvait le plus gros fil, de 1°,3 F. Or, comme une expérience préliminaire avait montré que trois pieds du fil fin avaient le même pouvoir conducteur que huit pieds du gros fil, il s'ensuivait que les résistances des fils étaient dans le rapport de 3,4 à 1,27, qui est précisément celui des effets calorifiques produits. D'autres expériences ont prouvé également que la quantité de chaleur dégagée est toujours proportionnelle à la résistance que le fil présente; quels que soient d'ailleurs sa longueur et son diamètre, sa forme ou sa nature, M. Joule a prouvé, en outre, que l'effet produit par un accroissement d'intensité du courant croît comme le carré de cet accroissement, ce qui est conforme aux lois de la mécanique. Les résultats consignés dans le tableau suivant ne laissent aucun doute à cet égard :

DÉVIATIONS moyennes de l'aiguille du galvanomètre.	QUANTITÉS de l'électricité en mouvement exprimée en degrés Q.	QUANTITÉS de chaleur produite en une demi-heure par les intensités électriques diverses de la colonne n° 2.	RAPPORT des carrés des intensités électriques de la colonne n° 2.	QUANTITÉS de chaleur produite en une heure par les intensités électriques diverses de la colonne n° 2.	RAPPORT des carrés des intensités électriques de la colonne n° 2.
16°	0°,43 Q	....	....	1°,2	1
31 $\frac{1}{2}$	0 ,92 Q	3°	2,9	4 ,7	4,55
55	2 ,35 Q	19,4	18,8	....	....
57 $\frac{2}{3}$	2 ,61 Q	23	23,2	....	....
58 $\frac{1}{3}$	2 ,73 Q	25	25,4	39,6	39,6

Ces résultats et d'autres que nous ne rapportons pas ici, l'ont mis à même d'en tirer la conséquence que lorsqu'un courant voltaïque parcourt un conducteur métallique, la chaleur dégagée dans un temps

donné est proportionnelle au produit de la résistance du conducteur par le carré de l'intensité électrique.

Nous aurions encore à parler des lois qui régissent la chaleur dégagée pendant la décomposition électro-chimique des liquides par les courants voltaïques; mais cette question trouvera naturellement sa place quand nous exposerons les décompositions électro-chimiques en général.

Nous venons de passer en revue les effets de chaleur les plus remarquables produits par le passage de l'électricité dans les corps conducteurs, soit à l'état libre, soit à l'état de courant, ainsi que les lois qui président à cette production. Ces effets prouvent la dépendance mutuelle entre la chaleur et l'électricité, dépendance qui ne permet plus de les séparer l'une de l'autre dans les phénomènes chimiques. On doit donc faire marcher de front les effets chimiques, électriques et calorifiques, si l'on veut embrasser dans leur ensemble les phénomènes résultant de l'action des particules similaires ou hétérogènes les unes sur les autres.

CHAPITRE III.

Effets calorifiques produits dans les actions chimiques.

Toutes les fois que deux corps réagissent chimiquement l'un sur l'autre, il y a production d'effets calorifiques dépendant de l'énergie avec laquelle s'exercent les affinités, des capacités calorifiques des parties composantes et du composé, de l'état solide ou liquide de ce dernier. La question thermo-chimique est donc complexe, puisqu'il y a des causes qui tendent, les unes à élever, les autres à abaisser la température.

Mais si en général il y a dégagement de chaleur dans les combinaisons, la réciproque n'est pas toujours vraie, car il peut y avoir sans cela production de chaleur au contact des solides et des liquides, comme les actions capillaires en sont un exemple. Il y a cette différence cependant que, dans ce cas-ci, la production est instantanée, tandis que dans l'autre elle continue tant que dure la combinaison. La question thermo-chimique a occupé depuis longtemps et occupe encore un grand nombre de physiciens, et cependant elle n'est pas

encore résolue. Nous citerons particulièrement Crawford, Lavoisier, Dalton, Ritter, Dulong, puis MM. Despretz, Hess et Andrews. Les résultats obtenus par chacun d'eux ne s'accordant pas toujours, nous allons rapporter les principaux, afin de mettre à même le lecteur de les comparer et de voir quel est aujourd'hui l'état de la question.

Les recherches peuvent être divisées en deux époques. Dans la première, on a eu pour but de trouver des faits isolés; dans la deuxième, des lois. Nous allons parcourir successivement ces deux époques.

La question du dégagement de la chaleur dans les actions chimiques ne peut être résolue que lorsqu'on connaît la chaleur spécifique des substances soumises à l'expérience, et qu'autant que l'on est familiarisé avec les méthodes d'expérimentation qui servent à la déterminer.

Toutes les causes qui concourent à ce dégagement n'avaient pas échappé à la haute sagacité de Lavoisier, qui, de concert avec Laplace, avait fait une étude approfondie des chaleurs spécifiques des corps. Ils avaient nommé *capacités de chaleur* ou *chaleurs spécifiques* les rapports des quantités de chaleur nécessaires pour élever d'un même nombre de degrés la température des corps à égalité de masse.

Crawford a employé d'abord la méthode des mélanges, qui consiste à mêler deux substances dont on connaît exactement le poids et la température, et dont l'une au moins est à l'état liquide, et à prendre la température du mélange quand elle est partout uniforme. En connaissant, en outre, le poids de chacune d'elles, celui du vase et sa chaleur spécifique, il est facile de déterminer celles des deux substances en prenant l'une pour l'unité.

Lavoisier et Laplace rejetèrent cette méthode comme sujette, suivant eux, à un grand nombre d'inconvénients qui exigeaient des calculs délicats pour être écartés; mais nous verrons, en exposant tout ce qui concerne les capacités calorifiques, qu'on y est parvenu sans difficulté, de telle sorte que la méthode des mélanges est aujourd'hui assez généralement adoptée.

Voici la méthode qu'ils ont substituée à celle des mélanges. Supposons une masse de glace à un degré quelconque, placée dans une atmosphère ayant une température supérieure à zéro : toutes les parties de la surface de cette masse prendront de la chaleur à l'atmosphère, jusqu'à ce que leur température soit parvenue à zéro. Toute la chaleur transmise sera employée uniquement à fondre une première

couche de glace, d'où résultera de l'eau; une seconde couche de glace sera fondue de la même manière, et ainsi de suite, jusqu'à ce que la température de l'atmosphère soit parvenue à zéro, qui est celle de l'eau provenant de la glace fondante.

Supposons qu'on place dans une sphère creuse un corps en glace échauffé à un degré quelconque : la glace se fondra jusqu'à ce que le corps soit à zéro; en recueillant l'eau avec soin, son poids sera exactement proportionnel à la chaleur que le corps aura perdue en passant de sa température primitive à celle de la glace fondante. Le poids de cette eau peut donc servir à mesurer la chaleur employée à produire cet effet.

Si les corps soumis à l'expérience ont le même poids, les chaleurs spécifiques sont proportionnelles aux quantités d'eau recueillies. Dans le cas contraire, pour les obtenir, il suffit de diviser la quantité de glace fondue par la température initiale du corps et par son poids; le quotient exprimera la quantité de glace fondue par l'unité de poids pour un refroidissement de 1°.

Cette méthode présente l'inconvénient de ne pouvoir recueillir exactement toute la quantité d'eau fondue, vu qu'il en adhère toujours une couche à la surface de la glace.

L'appareil qui sert à faire l'expérience a été appelé *calorimètre*. Nous ne nous arrêterons pas à sa description. Passons à l'emploi que Lavoisier en a fait pour déterminer la chaleur de combinaison dans plusieurs cas. Voici les principes sur lesquels il s'est appuyé, et qui sont encore généralement adoptés : lorsqu'on mélange ensemble plusieurs composés qui réagissent les uns sur les autres de manière à produire des décompositions et des combinaisons nouvelles, les chaleurs spécifiques de ces dernières ne seront plus les mêmes que celles de ces composés ; il peut se présenter alors trois cas.

Premier cas. Combinaisons sans dégagement ni absorption de chaleur. Ce cas peut se montrer quand il n'y a aucune portion de chaleur passant de l'état latent à l'état libre, et réciproquement.

Deuxième cas. Combinaisons dans lesquelles il y a dégagement de chaleur. Ce cas-là a lieu lorsqu'il entre dans les combinaisons moins de chaleur latente qu'il y en avait dans les premières.

Troisième cas. Combinaisons dans lesquelles il y a absorption de chaleur latente; dans ce cas, il y a plus de chaleur employée dans la nouvelle combinaison que dans la première; dès lors la chaleur des corps environnants est absorbée, et il y a abaissement de température.

Dans le simple mélange des corps, la quantité de chaleur libre

reste toujours la même. Si dans une combinaison ou dans un changement d'état quelconque il y a une diminution de chaleur libre, cette chaleur reparaîtra tout entière lorsque les substances reviendront à leur premier état, et réciproquement. S'il y a augmentation de chaleur libre, cette nouvelle chaleur disparaîtra dans le retour des substances à leur état primitif. Ces principes, nous le répétons, sont encore admis, mais avec cette condition que les effets calorifiques de dissolution ou de solidification viennent se joindre à ceux de combinaison.

Voici quelques résultats obtenus par Lavoisier.

Quantité de glace fondue par une livre de mélange :

D'acide sulfurique, d'une densité = à 1,87058 avec l'eau dans le rapport de 4 : 3.........	$0^{liv.}$	$14^{on.}$	2^{gros}	$62^{gr.}$
Du même acide avec de l'eau dans la proportion de 4 : 5.........................	0	12	6	48
De l'eau avec la chaux vive dans le rapport de 9 : 16.............................	1	8	3	60
D'acide nitrique, d'une densité = 1,29895, avec la chaux vive dans le rapport de $9\frac{1}{3}$: 3..	1	0	2	0

Les substances ont été prises à zéro et placées dans des vases à la même température, et les combinaisons ont été ramenées à zéro.

Quantités de glace fondue :

Dans la détonation d'une once de salpêtre avec $\frac{1}{3}$ d'once de charbon...............	$0^{liv.}$	$12^{on.}$	0^{gros}	$0^{gr.}$
Dans la détonation d'une once de salpêtre avec une once de fleur de soufre..........	2	0	0	0
Dans la combustion d'une once de phosphore...............................	6	4	0	48
Dans la combustion d'une once d'éther sulfurique.............................	4	10	2	36
Dans la combustion d'une once de charbon................................	6	2	0	0
La combustion d'une livre de charbon a fondu...............................	96	7	2	0
La combustion d'une livre d'hydrogène a fondu..............................	295	2	9	0

Or, comme la chaleur nécessaire pour fondre une livre de glace peut élever de 75° la température d'une livre d'eau, ou bien soixante-quinze livres d'eau à 1°, il s'ensuit que la combustion d'une livre de

charbon dégage d'après Lavoisier.................... 7234°

La combustion d'une livre d'hydrogène dégage......... 22139°

En se servant aussi du calorimètre, M. Despretz a déterminé les quantités de chaleur dégagées dans la combustion de l'hydrogène et du carbone. D'après ses expériences, 1 gramme de charbon, en brûlant, a dégagé 7914° de chaleur, c'est-à-dire, assez pour élever de 1° la température de 7914 grammes d'eau; 1 gramme d'hydrogène dégage 23640°; le phosphore, les métaux (le fer, le zinc et l'étain), les $\frac{5}{3}$ de la chaleur du charbon. Si nous comparons ces résultats à ceux obtenus par Lavoisier, on voit que ce dernier a trouvé, pour la combustion d'une livre de charbon, 7234° de chaleur; et M. Despretz, pour celle d'un gramme de charbon, 7914°. Pour la combustion d'une livre d'hydrogène, Lavoisier a obtenu 22139°, et M. Despretz, pour 1 gramme d'hydrogène, 23640° de chaleur.

Dans la combustion du protoxyde d'étain, il se dégage, suivant M. Despretz, la même quantité de chaleur pour une même quantité d'oxygène absorbé que dans la combustion de l'étain.

M. Dulong a cherché également la chaleur dégagée dans plusieurs actions chimiques, et a pris pour unité, comme M. Despretz, la quantité de chaleur nécessaire ponr élever de 1° un gramme d'eau à la température ordinaire. Un litre d'hydrogène à 0° et à 0,76 de pression a donné, en brûlant, en moyenne pour 5 expériences :

	unités.
Moyenne de 5 expér.......	3106,64
d'où il résulte que 1 litre d'oxygène à 0° et à 0m,76 de pression en se combinant avec l'hydrogène dégage en moyenne..................................	6213,28

Oxyde de carbone.

On l'a mélangé avec 1/2 de son volume d'hydrogène pour le faire brûler.

Chaleur de 1 litre d'oxyde de carbone.

Moyenne de 3 expér....... 3130,33

Gaz oléfiant.

Chaleur de 1 litre de gaz.

Moyenne de 4 expér....... 15338

Charbon.

1 litre de vapeur de carbone.

Moyenne de 4 expér....... 7858

Cyanogène.

1 litre de cyanogène.

Moyenne de 3 expér....... 1227,33

Soufre.

Soufre dans l'oxygène, par gramme.

Moyenne de 3 expér....... 2601,17

Fer.

Chaleur produite par litre d'oxygène combiné.

Moyenne de deux expér....... 6216,5

Étain.

Chaleur produite par litre d'oxygène combiné.

Moyenne de 3 expér....... 6175,33

Protoxyde d'étain.

Chaleur produite pour 1 litre d'oxygène combiné.

Moyenne de 2 expér....... 6302,9

Cuivre.

Chaleur dégagée par un litre d'oxygène.

Par les poids.

Moyenne de 3 expér....... 3598

Par les volumes............................. 3846,33

Protoxyde de cuivre.

Par litre d'oxygène........................... 3130

Antimoine.

Chaleur dégagée par un litre d'oxygène.

Par les poids.

Moyenne de 2 expér....... 5416,3

Par les volumes.

Moyenne de 5 expér....... 5531,88

La proportion d'oxygène absorbée correspond à l'acide antimonieux.

Zinc.

Chaleur dégagée par 1 litre d'oxygène.

Moyenne de 3 expér....... 7576,66

Cobalt.................................... 5721

Nickel.................................... 5333

Dulong, auquel la mort n'a pas permis de mettre la dernière main

à ses expériences, a consigné en note, dans ses manuscrits, qu'il pourrait bien exister un rapport simple entre la chaleur spécifique et la quantité de chaleur dégagée par une même absorption d'oxygène dans la combustion.

Si nous comparons les résultats obtenus par M. Despretz et Dulong pour le carbone et l'hydrogène, nous trouvons de grandes différences. En effet, suivant M. Despretz, un gramme d'hydrogène, en brûlant, dégage 23640° de chaleur; or, suivant M. Dulong, un litre d'hydrogène dégage 3106°, 64 de chaleur, ou 34786° de chaleur pour 1 gramme, nombre très-différent du précédent. Pour la combustion d'un gramme de charbon, la différence est dans le rapport de 7914 à 7163. Dès lors, de nouvelles expériences sont indispensables pour fixer l'opinion des physiciens sur les nombres que l'on doit adopter pour représenter la chaleur dégagée dans la combustion du carbone, de l'hydrogène et des principaux combustibles de la chimie.

Les travaux dont nous venons de rendre compte n'ont eu pour but que de trouver quelques faits particuliers relatifs à la chaleur dégagée dans les actions chimiques. M. Hess a voulu aller plus loin; il a cherché des résultats généraux, malgré les difficultés que présentait un semblable sujet. Son but a été de reconnaître d'abord si la quantité de chaleur dégagée variait suivant une loi quelconque quand la proportion des éléments qui entrent dans la combinaison variait elle-même.

Il a fait usage, à cet effet, d'un calorimètre en cuivre composé d'une caisse destinée à contenir de l'eau, et dans laquelle se trouvait un cylindre fixé à un axe, muni d'une manivelle située en dehors, de manière à pouvoir lui imprimer un mouvement de rotation; le cylindre pouvait être enlevé à volonté de la caisse, afin d'y introduire un vase en cuivre ou en verre, destiné à recevoir celui des deux liquides qui occupait le moins de volume; l'autre liquide se trouvant dans le cylindre, qui était muni, en outre, de tous ses accessoires pour qu'il fermât bien, et de quatre lames en cuivre servant d'agitateurs. Un thermomètre était placé convenablement dans la caisse pour ne pas être atteint par le cylindre en mouvement; on notait la température de tout l'appareil, puis, en faisant tourner la manivelle, le vase qui contenait l'un des liquides faisait bascule, le mélange des liquides s'opérait, et le thermomètre indiquait la température de l'eau de la caisse. On notait le temps où la température commençait à décroître, et les précautions avaient été prises pour éviter la déperdition de la chaleur à l'extérieur. Nous ajouterons que M. Hess a

représenté la chaleur dégagée par la quantité d'eau qu'une partie d'acide anhydre élève de 1° centigrade. Voici la première loi qu'il a cherché à établir : quand deux substances se combinent en plusieurs proportions, les quantités de chaleur dégagées par chacune de ces combinaisons se trouvent entre elles en proportions simples et multiples. Voici le résultat d'une des expériences qui ont servi à M. Hess à déterminer la quantité de chaleur dégagée dans la combinaison de H^2O+SO^3 avec H^2O, c'est-à-dire d'une proportion atomique d'acide sulfurique hydraté avec une proportion d'eau. Il a commencé par transformer son appareil sous le rapport de la capacité calorifique en grammes d'eau ; cet appareil, qui équivalait à 309 grammes, contenait en outre 7500 grammes d'eau. Le vase en verre pesait 100 grammes. Voici les résultats d'une des expériences :

L'appareil plein d'eau..........		7809,7 gr.
Vase en verre $100^{\circ} \times 0,19$		19
(0,19 est la chaleur spécifique du verre.)		
Acide (H^2O+SO^3) 266,4		
Eau........... 48		
$314,4 \times 0,474$	=	149,9
Toute la masse..	=	7978,6

0,474 est la chaleur spécifique du mélange d'eau et d'acide.

Augmentation de température indiquée par le thermomètre, 2°,1.

Or, si l'on prend pour unité la quantité d'acide anhydre contenu dans l'acide hydraté, on aura pour la quantité de chaleur dégagée :

$$\frac{7978,6 \times 2^{\circ},1}{(H^2O+SO^3)-H^2O} \quad \text{ou} \quad \frac{7978,6 \times 2^{\circ},1}{264,4-48} = 77,17.$$

En répétant cette expérience plusieurs fois, et variant les proportions atomiques des quantités d'eau absorbée, on a obtenu les résultats suivants :

Composition.		Chaleur dégagée.		
SO^3+H^2O	....	310,4	.....	8
$(SO^3+H^2O)+H^2O$	....	77,86	.....	2
$(SO^3+2H^2O)+H^2O$	....	38,9	.....	1
$(SO^3+3H^2O)+3H^2O$	....	38,9	.....	1
$(SO^3+6H^2O)+xH^2O$	....	38,9	.....	1
		504,96		

Les résultats consignés dans ce tableau nous montrent donc que les quantités de chaleur dégagées dans les combinaisons d'acide sulfuri-

que et d'eau sont entre elles dans un rapport simple et multiple. Maintenant, si on ajoute successivement ensemble d'abord tous les nombres qui expriment la chaleur dégagée, puis les quatre derniers et ainsi de suite, on aura les quantités de chaleur produites en mêlant de l'eau en excès aux acides.

Composition.	Chaleur dégagée.
SO^3	504,96
SO^3+H^2O	194, 5
SO^3+2H^2O	116, 7
$SO3+{}^3H^2O$	77, 8
$SO3+6H^2O$	38, 9

On voit encore ici les proportions multiples pour les quantités de chaleur dégagée ; il serait à désirer que des expériences plus variées et faites en plus grand nombre vinssent confirmer l'exactitude de cette loi.

M. Hess, au moyen du même mode d'expérimentation, a cherché à établir cette vérité, que, dans une combinaison, la quantité de chaleur dégagée est toujours constante, soit que la combinaison s'opère directement, soit qu'elle ait lieu indirectement et à diverses reprises. Cette loi ressort en effet des résultats consignés dans les tableaux suivants, et qui ont été obtenus de la manière indiquée précédemment en combinant l'acide sulfurique avec l'ammoniaque, d'une part, et la potasse, de l'autre.

Acide.	Quantité de chaleur dégagée — Par l'ammoniaque.	Par l'eau.	Somme.
SO^3+H^2O	595,8	—	595,8
SO^3+2H^2O	518,9	77,8	596,7
SO^3+3H^2O	480,5	116,7	597,2
SO^3+6H^2O	446,2	155,6	601,8
		Moyenne	597,0

Acide.	Quantité de chaleur dégagée — Par la potasse.	Par l'eau.	Somme.
SO^3+H^2O	597,2	—	597,2
SO^3+2H^2O	527,1	77,8	604,9
$SO^3+{}^3H^2O$	483,4	116,7	600,1
SO^3+6H^2O	445,4	155,6	601,0
		Moyenne	601,0

Les résultats consignés dans ces tableaux mettent en évidence la loi en question. En effet, la chaleur dégagée dans la combinaison de $SO^3 + H^2O$ avec l'ammoniaque $= 595{,}8$; dans celle de $SO^3 + 2H^2O$ avec l'ammoniaque, elle est égale à 518,94 ; or, si l'on ajoute à ce dernier nombre la chaleur dégagée par $SO^3 + 2H^2O$, on aura 596,7, qui diffère peu de 595,8 ; de même, si à la chaleur dégagée dans la combinaison de $SO^3 + 3H^2O$ avec l'ammoniaque, on ajoute 116,7, qui est la chaleur dégagée par $SO^3 + 2H^2O$, en mêlant l'eau en excès on aura 597,2, etc. Ainsi donc, quand on opère la combinaison d'une proportion atomique de base avec une proportion d'acide anhydre capable de la neutraliser, et celle de la même quantité de base avec la même proportion d'acide étendue d'une proportion d'eau, la quantité de chaleur dégagée dans le premier cas est égale à celle de la chaleur produite dans le second, plus la quantité obtenue en combinant l'acide anhydre avec la proportion d'eau.

Dans les deux derniers tableaux nous voyons que la potasse et l'ammoniaque, en se combinant avec l'acide sulfurique, ont donné sensiblement les mêmes quantités de chaleur ; il en a été de même pour la soude. M. Hess a fait encore d'autres déterminations que nous allons indiquer en raison de l'intérêt qu'elles présentent.

Dulong avait trouvé que 1 gramme de soufre, en brûlant dans l'oxygène, donnait en moyenne 2601 unités de chaleur ; M. Hess, qui a répété cette expérience, a trouvé, pour la moyenne de trois résultats, 2571°, qui diffère en moins de 30° de la détermination de Dulong, c'est-à-dire de $\frac{1}{90}$ environ.

La chaleur dégagée par l'acide nitrique et l'eau en mêlant l'acide nitrique, $H^2O + N^2O^5$, avec un excès d'eau a donné :

Pour la moyenne de 2 expériences 193,8

Pour les autres acides hydratés, il a obtenu :

$2H^2O + N^2O^5$	158
$3H^2O + N^2O^5$	14,2
$2H^2O + N^2O^5$	73,3
$6H^2O + N^2O^5$	56,8
$8H^2O + N^2O^5$	37,28

Ces résultats montrent que $H^2O + N^2O^5$ dégage, avec un excès d'eau, autant de chaleur que l'acide sulfurique $H^2O + SO^3$, p. 528, en remarquant toutefois que les quantités d'eau rigoureusement requises sont différentes. Car, pour l'acide nitrique, le second atome d'eau ne

dégage que 1 équivalent de chaleur; le troisième, 1; le quatrième, le cinquième et le sixième, chacun $\frac{1}{2}$; le septième et le huitième, $\frac{1}{2}$. Voyons ce que M. Hess entend par un équivalent ou unité de chaleur; on a vu p. 527 que, lorsque l'acide sulfurique, composé comme l'indiquent les formules, se combine avec le nombre d'atomes d'eau marqué, le rapport des quantités de chaleur dégagée est exprimé par les chiffres 8, 2, 1, 1, 1. Il est parti de là pour admettre que le troisième atome d'eau ajoutée dégage une unité de chaleur égale à 38,9, ou plutôt à 38,85 d'après de nouvelles expériences, valeur qu'il considère comme devant appartenir aussi à l'acide nitrique, et a obtenu les quantités calculées suivantes :

			avec excès.	trouvé.
$H^2O + N^2O^5 + H^2O$	38,85	$H^2O + N^2O^5$	194,25	193,8
$2H^2O + N^2O^5 + H^2O$	38,85	$2H^2O + N^2O^5$	155,40	158,0
$3H^2O + N^2O^5 + {}^2H^2O$	38,85	$3H^2O + N^2O^5$	116,55	114,2
$5H^2O + N^2O^5 + H^2O$	19,42	$5H^2O + N^2O^5$	77,68	73,3
$8H^2O + N^2O^5 + xH^2O$	38,85	$8H^2O + N^2O^5$	38,85	37,18

M. Hess a commencé à s'occuper d'une question d'un grand intérêt pour la physique moléculaire : c'est celle qui est relative aux rapports qui peuvent exister entre la quantité de chaleur dégagée dans une combinaison et la chaleur spécifique des corps, rapports qui avaient également attiré l'attention de Dulong. Mais les résultats obtenus sont en trop petit nombre pour qu'on puisse déjà saisir une loi.

M. Andrews a publié dans les *Transactions de l'Académie royale d'Irlande*, tome XIX, 2e partie, un travail sur la question qui nous occupe, et s'est particulièrement attaché à la combinaison des acides avec les bases, en opérant dans des circonstances telles que les variations de température pouvaient être considérées comme résultant seulement de la combinaison. Pour se débarrasser de la chaleur produite quand on étend d'eau certains acides et certaines bases, il a opéré sur des dissolutions très-étendues, dans des vases de verre dont on connaissait le poids, et en prenant une dissolution de la base et une d'acide un peu plus que suffisante pour la neutraliser, on effectuait le mélange dans le vase contenant la base ou l'alcali quand tout était à la même température, et dont les variations étaient observées avec un thermomètre très-sensible. L'expérience fut faite d'abord dans un cylindre de laiton très-mince, afin que sa température fût partout identiquement égale : le vase pesait 6 gr., 63; ce qui représentait 0 gr., 623

d'eau, en supposant la chaleur spécifique du cuivre égale à 0,094. M. Andrews détermina également le poids de l'eau équivalant au mercure du thermomètre et à la partie du verre immergée dans le liquide, et trouva en moyenne, 0 gr., 47; dès lors, le vase de cuivre et le thermomètre équivalaient à 0 gr., 093. Il eut aussi égard à la chaleur perdue par le refroidissement du vase dans l'air ambiant, et expérimenta de manière à pouvoir négliger cette cause d'erreur. Cette condition fut remplie en s'arrangeant pour que la durée de l'expérience ne dépassât pas une minute, et que l'élévation de température résultant de l'action chimique, n'excédât pas d'environ 1° celle de la température ambiante. L'acide nitrique le plus concentré dont il a fait usage contenait 13,2 °/₀ d'acide réel, dont une partie, étendue de neuf d'eau, ne donna pas la moindre trace de chaleur au thermomètre le plus sensible; il en fut de même de la dissolution alcaline ne contenant que 1,3 °/₀ d'alcali réel.

Voici les résultats de quatre expériences dans lesquelles on a fait varier les proportions des substances mélangées dans les rapports des nombres 1, 2, 4.

Première expérience.

Dissolut. de potasse. .	27 gr., 30	contenaient	0,0882 de potasse réelle.
— d'acide. .	2, 83	—	0,106 d'acide réel.
Vase et thermomètre.	1, 09		
Total.	31 gr., 22 d'eau.		

Température de l'air ambiant.	3°,33 centigrades.
— de l'acide	3°,44.
Dissolution alcaline.	2°,78.

Température moyenne avant le mélange.	2°, 84
— — après —	3°, 75
Accroissement de température.	0°, 91

Dans une expérience toute semblable, l'accroissement de température du mélange fut de 0°,89.

Dans une deuxième expérience où les substances mélangées étaient doubles, l'accroissement de température après le mélange fut de 1°, 79; dans la troisième expérience, où ces mêmes quantités étaient quadruplées, l'accroissement de température fut de 3°,33. En réduisant ces résultats à ceux qu'on eût obtenus si l'on eût employé 0 gr., 353 d'alcali et 30 gr. d'eau, on aurait eu :

1re	2e	3e	4e	moyenne.
3°,79	3°,72	3°,71	3°,81	3°,75

D'autres expériences furent faites dans un vase de verre avec 30 gr. d'eau et 0 gr., 353 de potasse, et l'acide nitrique; six expériences donnèrent pour moyenne 3°,23. Ce résultat diffère du précédent de 0°,52.

En opérant avec une base insoluble dans l'eau, l'action de l'acide devenant lente, il faut tenir compte du refroidissement du liquide pendant la durée prolongée des expériences. C'est en ayant égard à toutes ces précautions qu'on a obtenu les résultats suivants :

1° *Potasse ; quantité d'alcali réel* 0gr. 353

ACIDES.	ÉLÉVATIONS DE TEMPÉRATURE		DIFFÉRENCE par rapport à la valeur moyenne.
	observée.	corrigée.	
Acide sulfurique.	3°, 5	4°,07	+ 0°,45
— nitrique.	3, 22	3, 76	+ 0, 14
— phosphorique. . .	3, 17	3, 67	+ 0, 05
— arsénique.	3, 17	3, 67	+ 0, 05
— chlorhydrique. . .	3, 14	3, 64	+ 0, 02
— iodhydrique. . . .	3, 22	3, 75	+ 0, 13
— borique.	3, 11	3, 61	— 0, 01
— chromique. . . .	3, 08	3, 59	— 0, 03
— oxalique.	3, 17	3, 67	+ 0, 05
— acétique.	3, 06	3, 55	— 0, 07
— formique.	3, 06	3, 55	— 0, 07
— tartrique.	2, 92	3, 39	— 0, 23
— citrique.	2, 92	3, 39	— 0, 23
— succinique. . . .	2, 92	3, 39	— 0, 23
Moyenne. . . .	. . . . . .	3°,62	

2e *Baryte; quantité de baryte réelle*, 0gr.,572.

ACIDES.	Élévations de température		Différence par rapport à la valeur moyenne.
	Observée.	Corrigée.	
Acide nitrique	3°,28	3,81	+ 0°,06
— chlorhydrique	3,25	3,77	+ 0,00
— iodhydrique	3,33	3,87	+ 0,12
— Acétique	3,06	3,55	— 0,20
Moyenne		3°,75	

La soude en quantité réelle, 0 gr., 234, combinée avec les mêmes acides que ceux désignés dans le tableau de la potasse, a donné en moyenne, pour l'élévation de température corrigée, 3°,60.

L'ammoniaque, dont la dissolution contenait 0 gr., 129 d'alcali réel, a donné 3°,07.

Quant aux bases insolubles ou peu solubles, elles ont été employées à l'état anhydre.

0 gr. 154 de magnésie ont donné, avec les acides sulfurique, nitrique et chlorhydrique, une valeur moyenne pour l'élévation de température corrigée de 4°,58.

0 gr. 213 de chaux ont donné, avec les acides nitrique, chlorhydrique, acétique, une moyenne de 3°,94.

0 gr. 301 d'oxyde de zinc ont donné, avec les acides sulfurique, nitrique, chlorhydrique et iodhydrique, une moyenne de 2°,73.

Enfin, 0 gr. 834 d'oxyde de plomb, avec les acides nitrique et acétique, 2°,21.

M. Andrews a cru devoir tirer de ses expériences les conséquences suivantes, qu'il a formulées en lois:

Première loi.

« La quantité de chaleur dégagée pendant l'union des acides avec « les bases, dépend de la base et non de l'acide; car la même base, « combinée avec un équivalent de différents acides, donne à peu « près la même quantité de chaleur, tandis que les bases différentes, « combinées avec le même acide, en produisent des quantités différentes. »

Deuxième loi.

« Lorsqu'un sel neutre se convertit en un sel acide en se combi-
« nant avec un ou plusieurs équivalents d'acide, il n'y a aucun chan-
« gement de température. »

Troisième loi.

« Quand un sel neutre se convertit en un sel basique en se combi-
« nant avec une proportion additionnelle de base, la combinaison est
« accompagnée d'un dégagement de chaleur. »

Nous ferons remarquer en passant que l'acide sulfurique est celui qui dégage le plus de chaleur avec les bases.

La première loi que nous venons de signaler, et qui est la plus importante, n'est pas cependant sans exception; car le peroxyde de mercure, qui dégage la même quantité de chaleur avec les acides nitrique et acétique, ne se comporte pas de même à l'égard des hydracides, comme on peut le voir dans le tableau suivant :

Peroxyde de mercure; quantité de la base employée, 0gr.,810.

ACIDES.	Gain de température observée.	Durée de l'expérience.	Correction relative au temps.	Valeur corrigée ou gain de température.
Acide nitrique.	0°,67	2'	0°,03	0°,71
— acétique.....	0,67	2	0,03	0,71
— chlorhydrique	2,11	2	0,11	2,58
— cyanhydrique.	3,25	2	0,14	3,94
— iodhydrique..	5,11	2	0,33	6,33

L'acide cyanhydrique fait aussi exception à la loi; car, avec la potasse, la soude, la baryte et l'ammoniaque, il dégage près de 3° de moins que les autres acides.

Voici un des cas dans lequel M. Andrews n'a pas trouvé de chaleur, quand un sel neutre se change en un sel acide :

23 gr. d'une solution de potasse caustique, contenant 0 gr. 353 d'alcali, furent mêlés avec 7 gr. d'une dissolution d'acide oxalique

contenant 0 gr. 271 d'acide réel. La température, après le mélange, s'éleva de 3°,17.

31 gr. de dissolution d'oxalate neutre de potasse, contenant 0 gr., 624 de sel, mêlés avec 9 gr. d'une dissolution d'acide oxalique, contenaut 0 gr. 271 d'acide réel, ne donnèrent lieu à aucun dégagement de chaleur appréciable.

Quant à la troisième loi, elle a été vérifiée en transformant les phosphates et arséniates neutres alcalins en sous-phosphates et en sous-arséniates.

Nous ne poursuivrons pas plus loin l'examen du travail de M. Andrews; nous ferons seulement remarquer que les lois qu'il a trouvées, quoique présentant quelquefois des écarts considérables, se vérifient cependant dans un certain nombre de cas. Il pourrait se faire néanmoins qu'en variant les expériences, et se mettant en garde contre toutes les causes d'erreur, on parvînt à trouver de légères différences entre les nombres obtenus pour la quantité de chaleur produite dans la combinaison des bases avec les acides, de manière à établir des catégories qui ôteraient aux lois précédentes de leur généralité.

Une question se présente ici; elle est relative à l'origine électrique que l'on peut attribuer à la chaleur dégagée dans les actions chimiques. Les rapports sont tels entre ces deux agents, qu'on doit les chercher dans toutes les circonstances.

M. Joule s'en est occupé, en essayant de remonter à l'origine de la chaleur dans la combustion, et s'est servi pour cela d'un calorimètre particulier qu'il a décrit (*Phil. mag.*, février 1842). Voici les résultats que lui a donnés la chaleur dégagée par la combustion du zinc, du fer, du potassium et de l'hydrogène :

La chaleur dégagée dans la combustion de 32,3 grains (poids angl.) de zinc peut élever la température d'une livre d'eau de 10°,8 Fahr.

28 grains de fer, en brûlant, élèvent la température d'une livre d'eau de 9,48 F.

La chaleur dégagée pendant la conversion en potasse de 40 grains de potassium, élève la température d'une livre d'eau de 19°,6 F.

Un grain d'hydrogène, en brûlant, dégage assez de chaleur pour élever de 8,36 F. la température d'une livre d'eau.

M. Joule a établi de la manière suivante les rapports entre ces résultats, et ceux relatifs à la résistance que présentent les corps, quand ils livrent passage à l'électricité. Par des expériences antérieures, il avait montré que les intensités des affinités qui unissent l'oxygène au zinc, au fer, au potassium et à l'hydrogène gazeux, sont comme les

nombres 1,32, 1,18, 2,05 et 1. Or, comme les quantités proportionnelles de chaleur produites par la combustion des équivalents de ces corps sont, d'après les expériences dn physicien anglais (§ 47, 48 et 49 du mémoire déjà cité), 10°,8, 9°48, 17°6 et 8°,36 ; ou bien comme 1,29, 1,13, 2,105 et 1, rapports qui diffèrent très-pen des précédents, il en a conclu que les quantités de chaleur dégagée par la combustion des corps, étaient proportionnelles aux intensités de leur affinité pour l'oxygène. D'un autre côté, M. Joule, dans d'autres expériences que nous ne pouvons pas encore rapporter, a établi que cette loi s'obtient encore avec nn courant voltaïque, dont l'action dégage de la chaleur qui est produite par la résistance à la conductibilité; c'est en conséquence de cette comparaison qu'il a considéré la chaleur de la combustion comme ayant une semblable origine. Pour ajouter une nouvelle preuve en faveur de son opinion, il a déduit des quantités de chaleur dégagée par le mouvement d'un courant dans un fil métallique de résistance connue, celles qui, d'après la théorie de la résistance à la conductibilité électrique, sont produites par la combnstion des corps.

Or, M. Joule a trouvé par l'expérience, comme on l'a dit précédemment, que les quantités de chaleur dégagée par la combustion des équivalents des corps devraient, d'après les vues exposées touchant la résistance à la conductibilité électrique, être proportionnelles aux intensités de leur affinité ponr l'oxygène. Ces intensités sont comme les nombres 1,32, 1,18, 2,05 et 1, pour le zinc, le fer, le potassium et l'hydrogène. Il en résulte qu'on aura 13°,83, 12°,36, 21°47, 10°47 pour les quantités de chaleur produite dans la combustion de 32,3 grains de zinc, 28 grains de fer, 40 grains de potassium et un grain d'hydrogène. Si l'on compare ces résultats théoriques avec ceux précédemment indiqués, on verra que les premiers dépassent ceux-ci d'un quart. M. Joule pense que cette différence ne doit pas empêcher de regarder comme s'accordant ensemble, les résultats de l'expérience avec ceux du calcul, attendu la difficulté qu'il y a d'éviter les pertes de chaleur dans le mode d'expérimentation qu'il a employé. Il regarde donc comme démontré que la chaleur dégagée dans la combustion dont le résultat est la formation d'un électrolyte, est produite par la résistance qu'éprouve l'électricité à passer de l'oxygène dans le corps combustible, au moment de la combinaison. Il est à désirer que la loi trouvée par M. Joule se vérifie dans un plus grand nombre d'exemples que ceux qu'il a choisis, ainsi que dans toutes les actions chimiques. Au surplus, nous reviendrons sur cette question en traitant

des effets physiques qui accompagnent les décompositions chimiques.

Si de nouvelles expériences viennent à l'appui de cette loi, les vues de Davy et de M. Berzélius sur les rapports existant entre la chaleur et l'électricité, seraient encore appuyées sur de nouveaux faits, et il serait bien difficile de ne pas admettre alors que la chaleur dégagée dans la réaction de deux corps l'un sur l'autre, ne fût pas produite par la résistance qu'éprouvent les deux fluides en parcourant ces deux corps pour se recombiner.

Du dégagement de la chaleur dans les actions moléculaires.

Tout corps solide, à l'instant où il est mouillé par un liquide, dégage de la chaleur; ce fait est très-important en ce qu'il a de l'analogie avec l'effet produit quand les affinités exercent leur action. M. Pouillet, qui s'est beaucoup occupé de cette question, a fait une série d'expériences dont nous allons indiquer les principaux résultats.

Pour rendre sensibles les effets de la chaleur à l'instant où un corps solide est mouillé alors que la capillarité exerce seule son action, il faut que les substances soient réduites en poudre, afin de multiplier les points de contact du liquide et du solide. On trouve de grandes différences dans les résultats, suivant la nature des substances; dans quelques cas, la température monte jusqu'à 10°, tandis que dans d'autres, et c'est le plus souvent, elle n'est que de un quart ou d'un cinquième de degré. Les expériences ont été faites avec des thermomètres ordinaires; on conçoit que l'on aurait eu plus d'avantage à se servir d'appareils thermo-électriques, qui accusent les effets de chaleur à l'instant où celle-ci est produite, et avant que l'air et les corps environnants en aient absorbé une partie. Nous allons entrer dans quelques détails sur la production de ce phénomène, en raison de sa connexité avec la capillarité.

Pour donner plus de sensibilité à ces thermomètres, M. Pouillet en a employé dont le réservoir était de 4 à 5 centimètres de longueur et de 1 à 2 centimètres de diamètre. La tige avait 3 ou 4 décimètres de longueur, et le diamètre intérieur était si fin qu'on apercevait difficilement la colonne de mercure; pour la bien voir, il fallait placer entre elle et le verre un corps blanc translucide sur lequel elle se projetait. En réduisant les substances en poussière, non-seulement on multiplie les points de contact de la substance avec le liquide, mais on favorise encore l'action capillaire, et par suite le dégagement de chaleur. Il faut s'assurer, avant de commencer, que

les corps solides ou liquides, ainsi que les vases, aient exactement la même température. On remplit cette condition en expérimentant dans des lieux où celle-ci varie peu, comme dans une cave à 7 ou 8 mètres au-dessous du sol, et en ayant l'attention d'y laisser les corps pendant un temps suffisant pour qu'ils puissent prendre la température du milieu ambiant; il faut aussi qu'ils soient très-secs, car, s'ils étaient déjà recouverts d'une légère couche d'eau hygrométrique, l'effet serait nul. On doit éviter, en outre, le frottement du thermomètre sur les poudres, d'où résulterait nécessairement de la chaleur. En opérant ainsi, on observe que le thermomètre monte pendant 2 à 4', puis redescend lentement pour revenir à la température ordinaire.

Quand on pense à la masse considérable du cylindre à mercure, qu'il s'agit d'échauffer pour observer des effets de chaleur auxquels donnent lieu les actions capillaires, on conçoit de suite les avantages que l'on retirerait en substituant au thermomètre une aiguille mixte, fer et cuivre, en rapport avec un multiplicateur, recouverte de gomme laque pour éviter l'action chimique des liquides sur chaque métal, et plaçant les points de jonction dans le vase où l'on opère. Les corps soumis jusqu'ici à l'expérience sont le fer, le bismuth, l'antimoine, et les métaux qui peuvent être réduits facilement en limaille fine, les terres, les oxydes métalliques, le verre, la brique, la porcelaine et l'argile. Les liquides employés à mouiller ces corps sont l'eau distillée, l'huile, l'alcool, l'éther acétique et l'huile essentielle de térébenthine. On trouve d'abord que l'élévation de température est à peu près la même pour la plupart des solides avec le même liquide, et pour le même solide avec les différents liquides. Les plus faibles élévations de température sont de $\frac{1}{5}$ à $\frac{1}{4}$ de degré, et les plus fortes vont à peu près à un $\frac{1}{2}$ degré centigrade; avec l'huile, l'effet est un peu moindre qu'avec l'eau, l'alcool et l'éther.

Il y a également production de chaleur dans l'absorption. Si l'on prend un tissu organisé quelconque, sec et réduit en fragments, et qu'on le jette dans de l'eau, le thermomètre monte sensiblement; quand le tissu est très-sec, l'élévation de température est de plusieurs degrés. On a soumis ainsi successivement à l'expérience, parmi les substances végétales, le charbon, l'amidon, les écorces, etc., et parmi les substances animales, la soie, la laine, l'éponge, les cheveux, les peaux, etc.; l'élévation de température n'a jamais été au-dessous de 1°; avec l'amidon, la racine de réglisse et des membranes très-minces d'instestins de mouton, on n'a jamais eu moins de 10°. Sans parler

de la cause immédiate du phénomène, nous nous bornerons à constater son existence. Les tableaux suivants indiquent les résultats obtenus.

Tableau du dégagement de la chaleur produit par les substances inorganiques.

NOMS des substances.	Élévation de température en degrés du thermomètre centigrade quand les substances sont mouillées par			
	L'eau.	L'huile.	L'alcool.	L'éther acétique.
Verre	0,258	0,261	0,232	0,277
Fer	0,215	0,190	0,229	0,330
Cuivre	0,195	0,183	0,141	0,304
Zinc	0,234	0,208	0,250	0,231
Bismuth	0,230	0,220	0,246	0,193
Antimoine	0,221	0,225	0,308	0,286
Étain	0,310	0,254	0,329	0,219
Porcelaine	0,549	0,493	0,530	0,474
Brique	0,572	0,480	0,322	0,458
Argile	0,940	0,912	0,867	0,780
Silice	0,350	0,179	0,248	0,417
Alumine	0,204	0,187	0,217	0,341
Magnésie	0,212	0,148	0,208	0,229
oxyde de fer	0,286	0,215	0,300	0,424
Peroxyde de manganèse	0,307	0,236	0,341	0,430
Oxyde de zinc	0,198	0,166	0,211	0,271
Deutoxyde de cuivre	0,221	0,219	0,195	0,268
Litharge	0,241	0,263	0,232	0,452
Oxyde de chrome	0,160	0,153	0,219	0,318
Soufre	....	....	0,173	0,216

Nous voyons par ces résultats que l'élévation de température est à peu près la même pour les différents solides avec le même liquide, et qu'il en est fréquemment de même pour le même solide avec différents liquides.

Tableau du dégagement de la chaleur produit par les substances organiques.

NOMS des substances.	Élévation de température quand les substances absorbent.			
	L'eau.	L'huile.	L'alcool.	L'éther acétique.
	°	°	°	°
Charbon	1,16	0,96	1,27	1,41
Amidon	9,70	3,52	4,77	6,18
Sciure de bois	2,17	2,80	3,20	2,52
Racine de saxifrage	5,40	4,27	5,98	6,37
— pareira brava	5,23	3,38	4,06	5,88
— réglisse	10,20	4,19	7,17	6,54
— valériane	4,26	3,84	4,66	4,10
— bistorte	5,72	3,13	6,07	6,43
— iris	6,12	4,00	3,75	6,48
Farine de blé	2,72	1,19	3,40	4,10
— de blé de Turquie	2,32	1,22	3,32	3,72
— d'orge	2,22	1,15	2,87	3,83
— de seigle	2,55	1,43	2,92	4,50
— d'avoine	2,42	0,91	2,75	4,32
— de lin	2,07	....	1,73	3,48
Grains de blé	1,92	....	2,21	2,25
— de maïs	1,10	....	2,00	2,36
— d'orge	1,12	....	1,82	....
— de seigle	1,62	....	1,60	....
— de gruau	2,13	...	2,44	....
— d'avoine	1,19	....	1,56	....
— d'alpiste	1,15	....	1,29	....
— de pavot	1,27	....	1,11	1,39
— de millet	0,94	....	1,26	0,84
— de navette	1,10	....	1,28	0,94
Coton	0,97	1,25	0,83	1,67
Fil	2,11	1,17	2,78	3,18
Papier ordinaire	1,45	....	....	....
— desséché	4,52	2,12	3,60	....
Cheveux	2,06	2,31	1,28	3,45
Laine	3,17	3,38	2,54	3,12
Ivoire	3,14	2,18	1,49	....
Baleine	2,86	2,15	1,60	3,25
Cuir neuf	2,43	....	2,41	....
— — un peu charbonné	4,37	....	....	....
Éponge	1,90	....	....	....
Vessie de porc	2,40	1,84	2,58	3,60
Tendon de bœuf	3,16	1,17	3,31	3,24
Membranes très-minces d'intestins de mouton	9,63	....	10,12	8,38

Ces résultats nous montrent que les substances organiques dégagent plus de chaleur quand elles sont mouillées par des liquides que celles qui ne le sont pas, et qu'il n'existe pas de rapport entre les quantités de chaleur produites par la même substance et les différents liquides.

FIN DU PREMIER VOLUME.

TABLE DES MATIÈRES

CONTENUES DANS LE PREMIER VOLUME.

Pages.

INTRODUCTION HISTORIQUE.

CHAPITRE PREMIER.

CHAPITRE VII.

DE LA CHALEUR.

CHAPITRE VIII.

DE LA PESANTEUR.

CHAPITRE IX.

DES PHÉNOMÈNES CAPILLAIRES.

CHAPITRE X.

DE L'ACOUSTIQUE.

LIVRE PREMIER.

DE LA STRUCTURE DES CORPS.

CHAPITRE PREMIER.

CHAPITRE II.

CHAPITRE III.

VUES GÉNÉRALES SUR LA COMPOSITION ET LA STRUCTURE DES CORPS ORGANISÉS.

CHAPITRE IV.

CHAPITRE V.

LIVRE II.

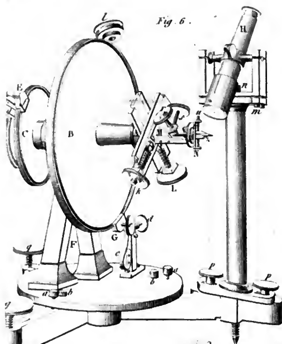
CHAPITRE PREMIER.

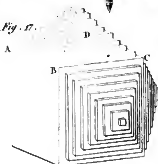
DE L'ÉLECTRICITÉ.

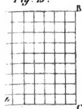
FIN DE LA TABLE DU PREMIER VOLUME.

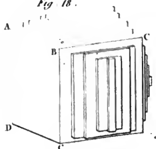
ERRATA.

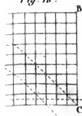
Pages.	Lignes.	
3	13	*au lieu de* ferm, *lisez* fermé.
61	au bas	— basses, *lisez* faibles.
88	26	sous l'influence des variations atmosphériques; *supprimez cette phrase.*
129	19	*au lieu de* à l'action du premier, *lisez* à l'action de la lumière diffuse.
256	11, 12, 13, 14, 15, 16, 17	*au lieu de* Ag, Pb, Am, Ba, Na, Sr. *lisez* Ag. O, Pb. O, Am. O, Ba. O, Na. O, Sr. O.
Id.	22, 23, 24, 25, 26, 27	*au lieu de* Ag, Cu, Zn, Ca, Mg, Na, *lisez* Ag. O, Cu. O, Zn. O, Ca. O, Mg. O, Na. O,
352	36	*au lieu de* chloroïde, *lisez* choroïde.
449	9	— *a', b*, *lisez* a' b',
461	21 et 30	— Rumfort, *lisez* Rumford.





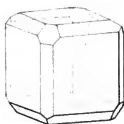


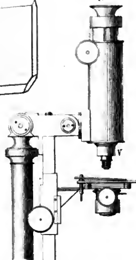




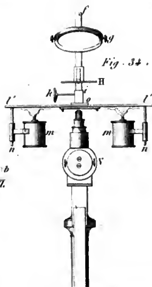
Dulos del. et sculp.

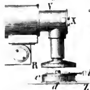
Fig. 20.











Dulos del. et sculp.

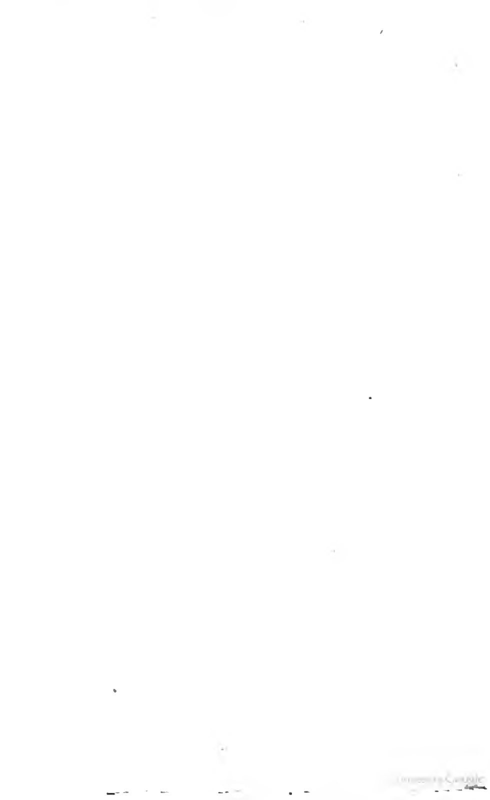


Fig. 7.

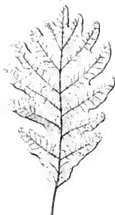


Fig. 8.

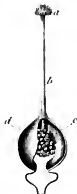


Fig. 9.



18.



Fig. 19.

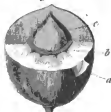


Fig. 20.



Fig. 21.



Fig. 29.



Fig. 31.



Fig. 33.



Fig. 30.



Fig. 32.



Fig. 34.



Dulos del. et sculp.

Fig. 6.



Fig. 6 bis.



Fig. 10.

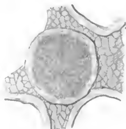


Fig. 11.



Fig. 19.



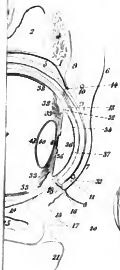


Fig. 20.



Fig. 21.

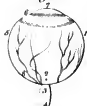
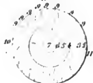


Fig. 22.



Fig. 23.



Dulot del. et sculp.

Fig. 8.

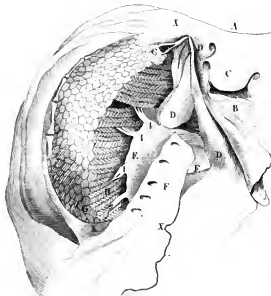
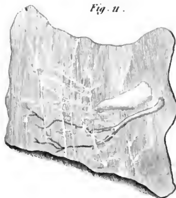


Fig. 9.



Fig. 11.



Dulce del. et sculp.

Fig. 7.

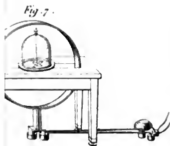


Fig. 8.

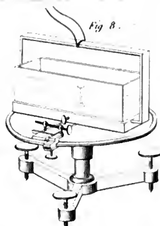


Fig. 19.

A'
A'
m'
m
C
B
k
D
E
L
D
E
G

Dulos del. et sculp.

